

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

**Ivan Bartulić**

Zagreb, 2016.

SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE

# **DIPLOMSKI RAD**

Mentor:

prof. dr. sc. Biserka Runje, dipl.ing.

Student:

Ivan Bartulić  
0035183505

Zagreb, 2016.

Izjavljujem da sam ovaj rad izradio samostalno koristeći stečena znanja tijekom studija i navedenu literaturu.

Posebno se zahvaljujem svojoj mentorici, prof. dr. sc. Biserki Runje, na pruženoj pomoći, strpljenju te iznimno korisnim savjetima i informacijama potrebnim za izradu ovog rada. Također se zahvaljujem asistentici Amaliji Horvatić Novak, mag. ing. mech., na vodstvu i savjetima pruženim tijekom izrade rada.

Ivan Bartulić



SVEUČILIŠTE U ZAGREBU  
**FAKULTET STROJARSTVA I BRODOGRADNJE**



Središnje povjerenstvo za završne i diplomske ispite  
Povjerenstvo za diplomske ispite studija strojarstva za smjerove:  
proizvodno inženjerstvo, računalno inženjerstvo, industrijsko inženjerstvo i menadžment, inženjerstvo  
materijala i mehatronika i robotika

Sveučilište u Zagrebu Fakultet strojarstva i brodogradnje
Datum 07-07-2018 Prilog
Klasa: 602-04/16-6/3
Ur.broj: 15-1703-16-252

## DIPLOMSKI ZADATAK

Student:

**IVAN BARTULIĆ**

Mat. br.: 0035183505

Naslov rada na  
hrvatskom jeziku:

**TOČNOST I PRECIZNOST REZULTATA DIMENZIONALNIH  
MJERENJA KOD PRIMJENE RAČUNALNE TOMOGRAFIJE**

Naslov rada na  
engleskom jeziku:

**ACCURACY AND PRECISION OF DIMENSIONAL COMPUTED  
TOMOGRAPHY DATA**

Opis zadatka:

Računalna tomografija (engl. Computed Tomography – CT) nova je metoda u dimenzionalnom mjeriteljstvu koja omogućuje mjerenje kako vanjskih, tako i unutarnjih geometrija predmeta mjerenja skeniranjem predmeta rendgenskim zrakama. U cilju utvrđivanja mjeriteljskih mogućnosti CT uređaja potrebno je, na odabranim predmetima i za odabrane parametre mjernog sustava, provesti analizu točnosti i preciznosti (ponovljivost i obnovljivost) rezultata mjerenja unutarnjih i vanjskih dimenzionalnih i geometrijskih značajki predmeta mjerenja.

U tekstu diplomskog rada potrebno je navesti korištenu literaturu i eventualnu pomoć pri izradi.

Zadatak zadan:

5. svibnja 2016.

Zadatak zadao:

Prof. dr. sc. Biserka Runje

Rok predaje rada:

7. srpnja 2016.

Predviđeni datum obrane:

13., 14. i 15. srpnja 2016.

Predsjednik Povjerenstva:

u. z.   
Prof. dr. sc. Franjo Cajner

## SADRŽAJ:

1.	UVOD.....	3
2.	RAČUNALNA TOMOGRAFIJA.....	5
2.1	PRINCIP RADA CT UREĐAJA .....	6
2.2	PODJELA INDUSTRIJSKIH CT UREĐAJA .....	6
2.3	PREDNOSTI I NEDOSTACI CT UREĐAJA .....	8
3.	INDUSTRIJSKI CT .....	9
3.1	TOČNOST I REZOLUCIJA MJERENJA CT-OM .....	9
3.2	PROCJENA TOČNOSTI I USPOSTAVALJANJE SLJEDIVOSTI .....	10
3.2.1	<i>Provjera performansi mjerenja računalne tomografije .....</i>	<i>10</i>
3.2.2	<i>Procjena mjerne nesigurnosti.....</i>	<i>11</i>
3.3	STRUKTURNA REZOLUCIJA ZA DIMENZIONALNO MJERENJE .....	12
3.3.1	<i>Metoda testiranja prema VDI/VDE 2617 - 13.....</i>	<i>12</i>
4.	DIJELOVI CT SUSTAVA .....	13
4.1	HARDWARE.....	14
4.1.1	<i>Izvor rendgenskih zraka .....</i>	<i>14</i>
4.1.2	<i>Detektori rendgenskog zračenja.....</i>	<i>18</i>
4.1.3	<i>Rotacijski stol .....</i>	<i>19</i>
4.1.4	<i>Kinematski sustav .....</i>	<i>20</i>
4.2	SOFTWARE.....	22
4.2.1	<i>Software za rekonstrukciju i detekciju rubova .....</i>	<i>22</i>
4.2.2	<i>Software za dimenzionalna mjerenja.....</i>	<i>23</i>
5.	UTJECAJNI PARAMETRI .....	24
5.1	SNAGA RENDGENSKOG ZRAČENJA .....	24
5.2	METODE SKENIRANJA .....	25
6.	MJERNI ASPEKTI.....	26
6.1	TOČNOST ASPEKTA .....	26
6.2	DETEKCIJE RUBOVA .....	26

7.	XCT UMJERAVANJE I PROVJERAVANJA SUSTAVA .....	28
7.1	XCT SUSTAV VERIFIKACIJE.....	28
7.2	MEĐUNARODNI STANDARDI ZA XCT TEHNOLOGIJU .....	28
7.3	REFERENTNI OBJEKTI.....	30
8.	USPOREDBA MJERENJA RAZLIČITIM METODAMA .....	31
9.	KLASIFIKACIJA POGREŠAKA MJERNOG SUTAVA .....	33
9.1	NETOČNOST .....	33
9.2	LINEARNA POGREŠKA .....	33
9.3	NESTABILNOST .....	34
9.4	PONOVLJIVOST .....	34
9.5	OBNOVLJIVOST .....	35
9.6	TOČNOST I PRECIZNOST.....	36
10.	NUMERIČKA ANALIZA MJERENJA SUKLADNO NORMI ISO 5725:1994 .....	37
10.1	MJERITELJSKI POJMOVI .....	37
10.2	METODE ZA ANALIZU MJERENJA.....	38
10.2.1	<i>Numeričke metode</i> .....	39
11.	EKSPERIMENTALNI DIO.....	41
11.1	NIKON XT H 225.....	44
11.1.1	<i>Ključne značajke i prednosti</i> .....	46
11.2	DIMENZIONALNO MJERENJE.....	46
11.3	OBRADA PODATAKA .....	48
11.3.1	<i>Aritmetička sredina</i> .....	48
11.3.2	<i>Eksperimentalno standardno odstupanje pojedinačnih opažanja unutar mjernog niza</i> .....	50
11.3.3	<i>Skupno eksperimentalno standardno odstupanje pojedinačnog opažanja unutar mjernih skupova</i> .....	52
11.3.4	<i>Eksperimentalno standardno odstupanje pojedinačnih mjerenja</i> .....	52
11.3.5	<i>Procijenjeno standardno odstupanje aritmetičkih sredina uzoraka</i> .....	53
11.3.6	<i>Međulaboratorijsko eksperimentalno standardno odstupanje</i> .....	53

11.3.7	<i>Eksperimentalno standardno odstupanje aritmetičkih sredina mjernih nizova oko aritmetičke sredine svih opažanja.....</i>	54
11.3.8	<i>Eksperimentalno standardno odstupanje obnovljivosti .....</i>	54
11.3.9	<i>Mjerna vrijednost ponovljivosti .....</i>	55
11.3.10	<i>Mjerna vrijednost obnovljivosti .....</i>	57
11.3.11	<i>Kritična razlika ponovljivosti.....</i>	57
11.3.12	<i>Kritična razlika obnovljivosti.....</i>	58
12.	ZAKLJUČAK.....	60
13.	LITERATURA .....	61

## POPIS SLIKA:

Slika 1. Prototip CT uređaja koji je razvio G. Hounsfield [8].....	3
Slika 2. Shema linijskog skenera [1] .....	7
Slika 3. Shema konusnog skenera [1].....	7
Slika 4. Prikaz "Pan Flute Gauge" [6] .....	11
Slika 5. CT sustav Nikon XT H 225.....	13
Slika 6. Spektar rendgenskog zračenja [1] .....	15
Slika 7. Vakuumska cijev za dobivanje rendgenskih zraka [2].....	16
Slika 8. Prva vakuumaska cijev za dobivanje rendgenskih zraka [5] .....	16
Slika 9. Slika povećanja i zamućenja pomicanjem objekta prema izvoru [2].....	17
Slika 10. Detektor u obliku ravne ploče .....	18
Slika 11. Detektor u linijskom modelu .....	19
Slika 12. Postavljanje geometrije sustava prilikom skeniranja [2].....	20
Slika 13. Postavljanje osi na industrijskim skenerima [2].....	21
Slika 14. Ishikawa dijagram utjecajnih parametara CT uređaja [7] .....	24
Slika 15. Utjecaj jakosti struje i napona na intenzivnost [2] .....	25
Slika 16. Detekcija ruba i graničnog iznosa sivila [1].....	27
Slika 17. Utvrđivanje graničnog iznosa sivila [1] .....	30
Slika 18. Usporedba točnosti rezultata mjerenja promjera i kuteva različitih tehnika [5] .....	32
Slika 19. Netočnost [3] .....	33
Slika 20. Linearna pogreška [3].....	33
Slika 21. Nestabilnost [3] .....	34
Slika 22. Ponovljivost [3] .....	35
Slika 23. Obnovljivost [3] .....	35
Slika 24. Usporedba točnosti i preciznosti [3].....	36
Slika 25. Dijagram toka kod numeričkog ispitivanja grubih pogrešaka [13].....	39
Slika 26. 3D model mjerenog cilindra.....	41
Slika 27. Prikaz modela u raznim projekcijama .....	42
Slika 28. Prikaz promjera cilindra .....	43
Slika 29. Prikaz mjerenja duljine cilindra .....	44
Slika 30. Nikon XT H 225 [11] .....	45



## POPIS TABLICA:

Tablica 1. Međunarodni standardi za XCT tehnologiju [1].....	29
Tablica 2. Matrični model mjernih nizova [12].....	38
Tablica 3. Konstantni parametri prilikom mjerenja.....	46
Tablica 4. Rezultati mjerenja.....	47
Tablica 5. Referentne vrijednosti promatranih dimenzija cilindra .....	48
Tablica 6. Rezultati aritmetičkih sredina nizova .....	49
Tablica 7. Aritmetičke sredine N rezultata mjerenja.....	50
Tablica 8. Rezultati procijenjenih standardnih odstupanja unutar i-tog mjernog niza.....	51
Tablica 9. Rezultati skupnih eksperimentalnih standardnih odstupanja pojedinačnih mjerenja unutar skupa.....	52
Tablica 10. Rezultati procijenjenih standardnih odstupanja aritmetičkih sredina uzoraka .....	53
Tablica 11. Rezultati među laboratorijskog eksperimentalnog standardnog odstupanja .....	54
Tablica 12. Rezultati standardnih odstupanja aritmetičkih sredina mjernih nizova oko aritmetičke sredine svih mjerenja.....	54
Tablica 13. Rezultati procijenjene standardnog odstupanja obnovljivosti.....	55
Tablica 14. Studentova t- razdioba.....	56
Tablica 15. Rezultati mjerne vrijednosti ponovljivosti .....	56
Tablica 16. Rezultati mjerne vrijednosti obnovljivosti .....	57
Tablica 17. Rezultati kritične razlike ponovljivosti.....	58
Tablica 18. Prikaz odnosa ponovljivosti.....	58
Tablica 19. Rezultati kritične razlike obnovljivosti.....	59
Tablica 20. Prikaz odnosa obnovljivosti.....	59

## POPIS OZNAKA:

Oznaka	Jedinica	Opis
$r$		Mjerna vrijednost ponovljivosti
$CrDr$		Kritična razlika ponovljivosti
$R$		Mjerna vrijednost obnovljivosti
$CrDR$		Kritična vrijednost obnovljivosti
$\Phi_v$	mm	Vanjski promjer
$\Phi_u$	mm	Unutarnji promjer
$L$	mm	Duljina
$U$	kV	Napon
$I$	$\mu A$	Jakost struje
$\bar{x}$	mm	Aritmetička sredina
$\bar{\bar{x}}$	mm	Aritmetička sredina N rezultata mjerenja
$s_i$		Procijenjeno standardno odstupanje
$s_r$		Procijenjeno standardno odstupanje unutar mjernih skupova
$s_{\bar{x}}$		Procijenjeno standardno odstupanje aritmetičkih sredina uzoraka
$s_L$		Među laboratorijsko procijenjeno standardno odstupanje
$s_d$		Procijenjeno standardno odstupanje aritmetičkih sredina mjernih nizova oko aritmetičke sredine svih mjerenja
$s_R$		Procijenjeno standardno odstupanje obnovljivosti

## SAŽETAK

Tema ovog diplomskog rada je ispitivanje točnosti i preciznosti rezultata dimenzionalnog mjerenja kod primjene računalne tomografije. Računalna tomografija omogućuje mjerenje kako vanjskih, tako i unutarnjih geometrija i kontura predmeta mjerenja skeniranjem predmeta rendgenskim zrakama. U radu je ukratko opisan postupak skeniranja pomoću CT uređaja, zatim rekonstrukcija uz komentare dobivenih snimaka, komponente samog CT uređaja, te utjecajni parametri mjernog sustava od kojih je najviše pažnje posvećeno analizi točnosti i preciznosti rezultata mjerenja. To su sve čimbenici koji utječu na mogućnost korištenja CT uređaja.

Parametri mjernog sustava postali su od ključne važnosti razvojem tehnologije jer je važno ispitati kako mogu utjecati na rezultate mjerenja. Za pouzdane rezultate mjerenja potrebno je provesti povećani broj ispitivanja i mjerenja, ali i u raznim uvjetima što dovodi do zaključka o velikom opsegu toga posla. U cilju procjene preciznosti mjernog sustava u radu je provedena analiza ponovljivosti i obnovljivosti rezultata mjerenja.

**Ključne riječi:** računalna tomografija, točnost, preciznost, dimenzionalno mjeriteljstvo

## **SUMMARY**

The subject of this graduate thesis is investigation of precision and accuracy of results in dimensional measurement, with the application of computer tomography. Computer tomography enables inner and outer object geometry measurements with the application of X-rays. This thesis shortly describes scanning of an object using an industrial CT scanner, reconstruction of scanned images with commentary, CT scanner components, and influence factors. Main subject is precision and accuracy analysis. Those are all factors which influence the use of CT scanners in dimensional measurements.

Parameters have a crucial importance in technology development, because they influence measurement results. It takes a significant number of conducted measurements for reliable measurement results. A significant number of conducted measurements result in resounding data and time consumption. One of the most important parameters of significant number of conducted measurements are repeatability and reproducibility. That is accuracy and precision.

**Key words:** computed tomography, accuracy, precision, dimensional metrology

## 1. UVOD

Računalna tomografija (eng. *Computed Tomography* - CT) je nova metoda u dimenzionalnom mjeriteljstvu koja omogućuje mjerenje kako vanjskih, tako i unutarnjih geometrija i kontura predmeta mjerenja. Uređaj radi na principu skeniranja predmeta rendgenskim zrakama i daje snimke velikog broja dvodimenzionalnih prikaza predmeta pri različitim kutevima gledanja. Tako dobiveni zapisi snimaka iz više dvodimenzionalnih skenova nastaje jedan trodimenzionalni model.

Samo porijeklo riječi tomografija ( grč. *tomos* - presjek, *graphein* - pisati) govori da se pomoću nje daje istovremeni uvid u vanjsku, ali i u unutarnju strukturu predmeta koji se ispituje. Prvu ideju da se uopće ispituje unutrašnjost strukture pojedinog predmeta, ali i to da se iz raznih kuteva može promatrati struktura pomoću rendgenskih snimaka donio je Godfrey Hounsfield. On nije imao informacije da je u isto vrijeme i Allan Cormack na sveučilištu u SAD-u radio također na takvom uređaju. Oboje su 1979. godine dobili i Nobelovu nagradu na području medicine i fiziologije, za razvoj CT uređaja [1].



Slika 1. Prototip CT uređaja koji je razvio G. Hounsfield [8]

Prvi CT uređaj koji je osposobljen za korištenje bio je 1971. godine, a prvo snimanje izvedeno je na pacijentu, u bolnici Atkinson Morley u Ujedinjenom Kraljevstvu, koji je imao tumor na prednjem režnju mozga. 1975. u Kanadi, snimljen je mumificirani mozak a 1976. snimljeno je mumificirano staroegipatsko tijelo. Poslije toga CT uređaj odmah je prihvaćen u medicini i često se spominje kao najvažnije otkriće u radiologiji poslije otkrića rendgenskih zraka. Prva primjena CT uređaja u industriji potječe iz 1980-ih u području nerazornih ispitivanja i analize materijala, a koristila se za proučavanje unutrašnje strukture materijala. U dimenzionalnom mjeriteljstvu, metoda računalne tomografije javlja se kao alternativa taktilnim i optičkim trokoordinantnim mjernim sustavima.

Prvi pokušaji provođenja dimenzionalnih mjerenja pomoću CT uređaja su se pojavili početkom 90-ih godina, no točnost nije bila bolja od 0,1 mm. Važan pomak u tehnologiji se pojavio 2005. godine, kada je na Sajmu kontrole u Njemačkoj predstavljen prvi CT uređaj za dimenzionalno mjeriteljstvo. Od tada do danas nekoliko većih proizvođača mjeriteljskih instrumenata počelo se baviti i razvojem te usavršavanjem uređaja za dimenzionalno mjerenje metodom računalne tomografije [2].

## 2. RAČUNALNA TOMOGRAFIJA

CT je izvrsna novost u dimenzionalnom mjeriteljstvu jer omogućuje ispitivanje više vrsta materijala, a samim time i jednostavniju tolerancijsku i geometrijsku kontrolu kvalitete. CT uređaj ima mogućnost provjere vanjske i unutarnje strukture komada u raznim industrijskim primjenama kao i pružanje informacija o geometriji predmeta što je također doprinos skraćanju vremena potrebnom za detaljnu analizu strukture. Kako je CT beskontaktna metoda mjerenja ona se može uspoređivati i s drugim beskontaktnim metodama mjerenja kao što su npr. 3D skeneri. Jedna velika prednost računalne tomografije je u tome što je omogućena provedba dimenzionalne kontrole kvalitete i kontrole kvalitete materijala u isto vrijeme što je od velike važnosti za današnje zahtjeve.

Područja primjene računalne tomografije su medicina, analiza materijala i dimenzionalno mjeriteljstvo. Za navedena područja primjena računalne tomografije zajedničko je što se zasnivaju na istim fizikalnim i matematičkim principima, ali sami uređaji i procedura izvođenja ispitivanja ili mjerenja se značajno razlikuju jer se razlikuju ciljevi i svrhe korištenja CT uređaja. U medicini mora biti smanjena snaga radijacije kako bi se zaštitio pacijent od opasnog zračenja. Nadalje, sam objekt ispitivanja, u tome slučaju čovjek, ne može se okretati na isti način kao i uzorci, ili dijelovi u tehničkim CT uređajima. Sljedeća bitna razlika je u točnosti jer ona u medicini nije toliko bitna kao što je bitna u industriji. Sljedeća razlika je to što je u mjeriteljstvu potrebna velika penetrirajuća snaga jer su predmeti proučavanja i snimanja puno veći i deblji, ali su i napravljeni od materijala velikih gustoća (npr. olovo). Zatim je u dimenzionalnoj kontroli kvalitete potrebna velika razlučivost i točnost.

Iako je CT u primjeni već dosta dugo u medicini i analizi materijala, njegova primjena u dimenzionalnom mjeriteljstvu još uvijek je u razvoju te zahtijeva daljnja istraživanja s ciljem razvoja i poboljšanja same metode [1,2].

## 2.1 PRINCIP RADA CT UREĐAJA

CT uređaji sastoje se od više komponenti, no tri glavne su izvor zračenja, rotacioni stol na kojem je postavljen objekt, te detektor rendgenskih zraka.

Izvor stvara rendgenske zrake te one prodiru kroz objekt, zatim postaju prigušene zbog apsorpcije i rasipanja zraka. Razina prigušenja zraka je određena duljinom prodiranja u materijal, gustoćom materijala i kemijskim sastavom, te energijom rendgenskih zraka. Prigušenje se mjeri tako da se detektiraju preostale rendgenske zrake, koje putuju objektom (pomoću detektora zraka), što za rezultat ima dvodimenzionalnu sivu sliku u slučaju ravne ploče ili jednodimenzionalni sivi profil u slučaju jednodimenzionalnog linijskog detektora. Slike se snimaju iz različitih pozicija pogleda na objekt snimanja. Zatim se pomoću matematičke rekonstrukcije projiciranih slika vodi do trodimenzionalnog modela, gdje je vrijednost sivila mjera apsorpcije materijala. Idući koraci čine obradu podataka, uključujući detekciju rubova objekta, te dimenzionalno mjerenje [2].

Izrada tomografske slike se sastoji u mjerenju apsorpcije zračenja koje prodire u objekt koji se mjeri. Volumen predmeta je podijeljen na male ćelije koje se nazivaju vokseli i imaju isti koeficijent apsorpcije linearnog zračenja. Dobiveni oblak točaka omogućava provođenje analize dimenzija i unutarnje strukture materijala [5].

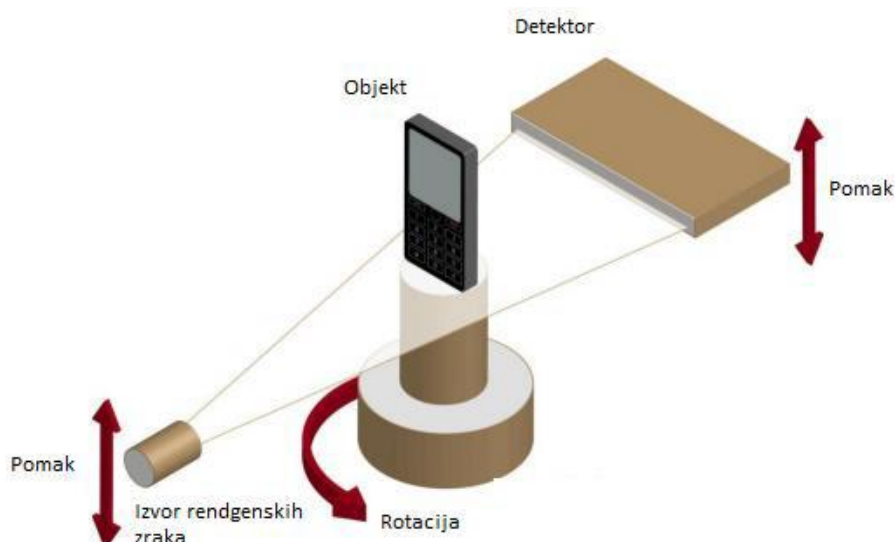
## 2.2 PODJELA INDUSTRIJSKIH CT UREĐAJA

Prema obliku rendgenskog snopa industrijski CT sustavi mogu se podijeliti na linijske i konusne, a zatim se još dodatno dijele prema nivou energije.

### *1) Linijski (line-beam) skeneri*

Ovi CT sustavi predstavljaju prvu generaciju skenera i koriste linearan snop zraka za skeniranje volumena za vrijeme njegove rotacije. Svi dobiveni 2D snimci su iskorišteni za dobivanje 3D prikaza objekta. U ovom se načinu skeniranja koriste linijski detektori. Princip rada prikazan je na slici 2.

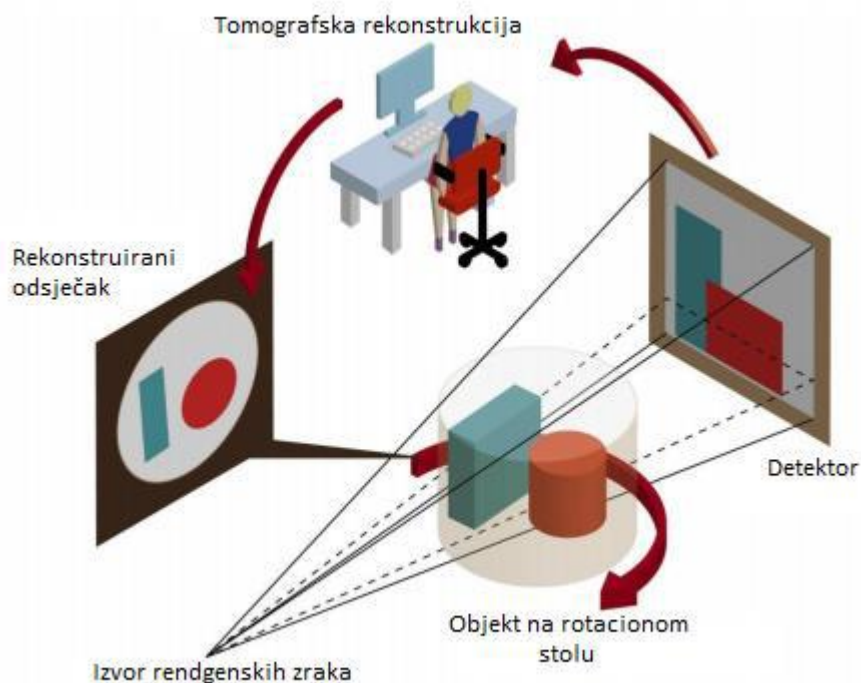




Slika 2. Shema linijskog skenera [1]

## 2) Konusni (cone-beam) skeneri

Konusni CT skeneri koriste konusni oblik rendgenskog snopa, za uzimanje velikog broja dvodimenzionalnih snimaka objekta ili 2D zapisa za vrijeme njegovog rotiranja. Dobiveni 2D prikazi se zatim obrađuju i prevode u 3D zapis. U ovim se tipovima skenera koriste detektori izvedeni kao ploča. Princip rada prikazan je na slici 3.



Slika 3. Shema konusnog skenera [1]

## 2.3 PREDNOSTI I NEDOSTACI CT UREĐAJA

Primjena CT-a u industriji ima mnoge prednosti, ali i nedostatke. Kao jedna od glavnih prednosti je mogućnost nerazornih ispitivanja za provjeru proizvoda. Samim time smanjeni su troškovi dodatnih analiza i provjera. Nadalje, omogućena je brza provjera vanjskih i unutarnjih komponenata proizvoda. Sljedeća prednost je velika preciznost bez potrebe stezanja elementa prilikom snimanja pa se time izbjegavaju pojave deformacija i oštećenja. U dimenzionalnom mjeriteljstvu, ova beskontaktna metoda omogućuje mjerenje unutrašnjosti proizvoda s velikom preciznošću, bez razaranja objekta. CT snimak se sastoji od baze podataka velike količine mjernih točaka. Bilo koji drugi mjerni instrument ne može dobiti tako veliki broj površinskih točaka [8].

Glavni nedostatak metode računalne tomografije u području dimenzionalnog mjeriteljstva jest izostanak mjeriteljske sljedivosti, a povezano s tim i nepoznata mjerne nesigurnost rezultata mjerenja. Utjecaj brojnih faktora u mjernom sustavu doprinosi nepoznatoj mjernoj nesigurnosti rezultata. Također, jedan od nedostataka jest i izostanak standardnih protokola za provedbu ispitivanja.

### 3. INDUSTRIJSKI CT

Za postizanje sljedivosti rezultata dimenzionalnih mjerenja pomoću računalne tomografije potreban je sustav za provjeru dimenzijske točnosti i drugih čimbenika koji utječu na mjerenja pomoću računalne tomografije (CT). Također, potrebno je te iste čimbenike provjeriti kako bi se računalna tomografija mogla uspoređivati s ostalim tehnikama i metodama mjerenja u području mjeriteljstva [6].

#### 3.1 TOČNOST I REZOLUCIJA MJERENJA CT-OM

Posebna pažnja, kod dimenzionalnog mjerenja, posvećuje se strukturnoj rezoluciji kao veoma bitnoj karakteristici koja se često zanemaruje prilikom testiranja CT sustava. Nakon što su se razmotrile sve moguće metode za određivanje strukturne rezolucije, pojavila se metoda koja je zasnovana na temelju novog kalibriranog referentnog standarda koja bitno olakšava procjenu strukturne rezolucije. Prednosti koje omogućuje novonastala metoda su te da je moguć kompletan pregled unutarnjih značajki nerazornim ispitivanjem, omogućeno je izvođenje mjerenja cijelog komada dobivanjem potpune informacije u količini podataka. Također je moguće simultano provoditi analizu materijala i dimenzionalne kontrole kvalitete tako da se mjere sve komponente sklopa. Kako bi se osigurala točnost mjerenja u usporedbi s drugim mjernim sustavima potrebno je provesti temeljitu provjeru mjeriteljskog sustava CT. Kao što se trokoordinatni mjerni uređaji (CMM) moraju povremeno testirati kako bi potvrdili kvalitetu mjerenja to isto testiranje mora se provoditi i kod primjene računalne tomografije. Osim toga, kako bi se osigurala sljedivost, moraju biti naznačene mjerne nesigurnosti dimenzionalnog mjerenja pomoću CT-a za svako pojedino mjerenje.

Međutim problem se pojavljuje što sve do danas ne postoje jasni međunarodni standardi za mjeriteljsko ispitivanje i procjenu nesigurnosti u području dimenzionalnog mjeriteljstva uz pomoć računalne tomografije. Postoje objavljene samo nacionalne smjernice za specifične procedure, ali međunarodni standardi, koji bi u potpunosti definirali korištenje CT tehnike, su još uvijek u početnoj fazi razvoja jer je računalna tomografija nova metodologija u dimenzionalnom mjeriteljstvu. Nadalje, svi postojeći standardi odnose se samo na taktilne i optičke trokoordinatne mjerne sustave (CMM) te se oni ne mogu primijeniti i za računalnu tomografiju zbog različite metode mjerenja i različitih izvora pogrešaka koji utječu na proces mjerenja. Nedostatak

prihvaćanja međunarodnih pravila jedan je od glavnih ograničenja zbog kojeg se računalna tomografija još uvijek ne smatra pouzdanom i točnom tehnikom mjerenja. Neophodne su međunarodno prihvaćene procedure ispitivanja pomoću računalne tomografije i to ne samo kako bi se omogućilo korisnicima lakše uspoređivanje različitih uređaja za mjerenje, nego i za iskorištavanje velikog potencijala i mogućnosti koje nudi računalna tomografija. Nadalje, standardizacija je nužna kako bi se zaštitili proizvođači od tehničkih i poslovnih rizika, te kako bi mogli jamčiti cjelokupnu učinkovitost sustava kupcima [6].

## **3.2 PROCJENA TOČNOSTI I USPOSTAVALJANJE SLJEDIVOSTI**

U dimenzionalnom mjeriteljstvu pomoću računalne tomografije potrebno je, kao i za ostale mjerne tehnike, definirati dvije važne karakteristike kako bi se odredila procjena točnosti mjerenja i osigurala sljedivost, a to su:

- provjera mjeriteljski performansi
- procjena mjerne nesigurnosti

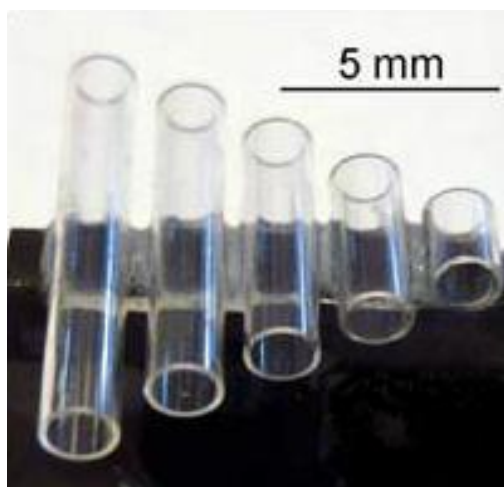
Prva karakteristika je temeljna i potrebno je provjeriti performanse mjerenja određenim testovima kako bi se dokazala sposobnost CT sustava za mjerenje kalibriranih veličina i oblika. Također je potrebno provesti analize za određivanje mjerne nesigurnosti i utvrđivanja sljedivosti [6].

### **3.2.1 PROVJERA PERFORMANSI MJERENJA RAČUNALNE TOMOGRAFIJE**

Kako bi se osigurala usporedivost rezultata, ne samo s različitim CT sustavima nego i s drugim mjernim sustavima (npr. CMM), procedure za testiranje računalne tomografije trebaju, po mogućnosti, biti usklađene s načelima ISO 10360 - 2 (međunarodna norma za ispitivanje CMM-a).

Upravo zbog toga su se razvile njemačke smjernice VDI/VDE 2617 - 13 u kojima je opisan postupak za postizanje usporedivosti između taktilnih i optičkih trokoordinantnih mjernih uređaja (CMM). Upravo zbog toga je spomenuta norma ISO 10360 - 2 usko povezana sa smjernicama VDI/VDE 2617 - 13 koje se smatraju kao, trenutno, najvažniji postojeći dokument za razvoj budućeg međunarodnog standarda o provedbi provjere performansi mjernog sustava. Glavni testovi koji se navode u VDI/VDE 2617 - 13 su oni potrebni za procjenu grešaka za mjerenje

duljine. Za procjenu grešaka prilikom mjerenje duljine potrebno je izmjeriti 5 različitih kalibriranih duljina. Na slici 4. može se vidjeti primjer kalibriranja u kojem se ispituje greška mjerenja duljine u skladu s VDI/VDE 2617 - 13. Primjer nosi ime "*Pan Flute Gauge*" i sastoji se od 5 kalibriranih staklenih cijevi različitih duljina, a razvijen je na Sveučilištu u Padovi [6].



Slika 4. Prikaz "*Pan Flute Gauge*" [6]

### 3.2.2 PROCJENA MJERNE NESIGURNOSTI

Dimenzionalna mjerenja dobivena pomoću računalne tomografije moraju sadržavati izjavu o nesigurnosti namijenjenu specifičnom mjerenju. Za procjenu mjerne nesigurnosti potrebno je utvrditi kvalitetu mjerenja, donijeti odluke o ne/sukladnosti specifikacije s proizvodom i postići sljedivost. Kako bi se dobio ispravan uvid u nesigurnost potrebno je provesti opću referentnu metodu koja je navedena u *Vodiču za nesigurnost u mjerenju* (GUM). Međutim ne postoje međunarodni standardi i smjernice koje se odnose na procjenu mjerne nesigurnosti za konkretne slučajeve u mjerenju s računalnom tomografijom [6].

### **3.3 STRUKTURNA REZOLUCIJA ZA DIMENZIONALNO MJERENJE**

Kao što je definirano u smjernicama VDI/VDE 2617 - 13 rezolucija strukture se opisuje kao veličina najmanjih dijelova strukture koji se još uvijek mogu mjeriti u definiranim granicama pogrešaka [6].

#### **3.3.1 METODA TESTIRANJA PREMA VDI/VDE 2617 - 13**

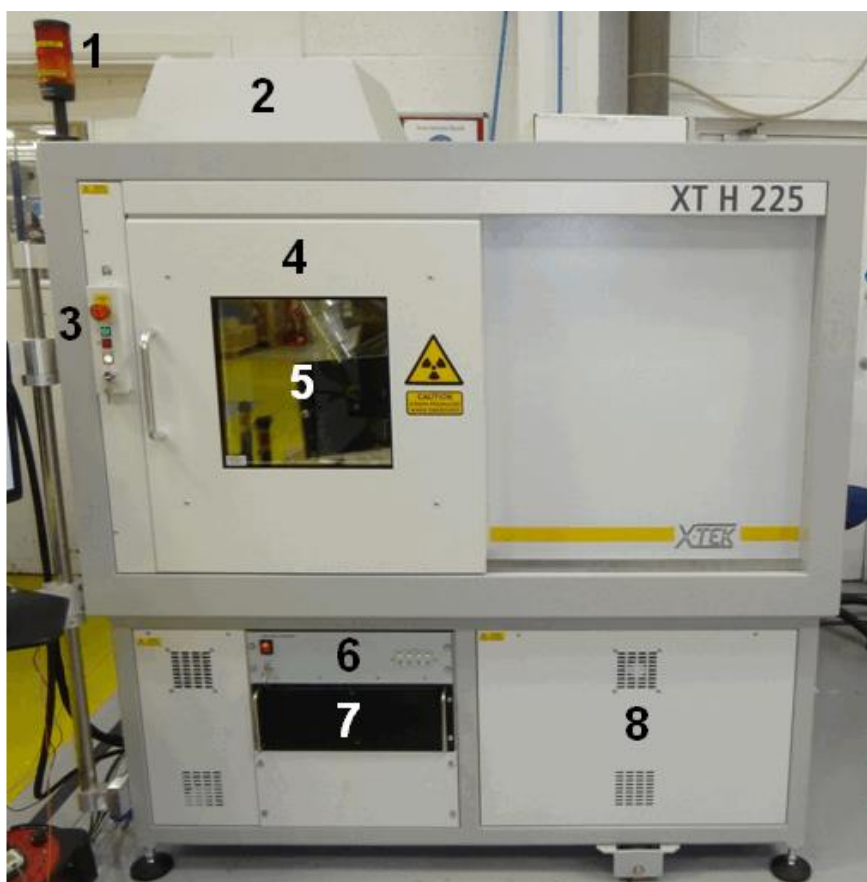
U ovom dijelu smjernice VDI/VDE 2617 predložena je metoda za testiranje rezolucije strukture u dimenzionalnom mjeriteljstvu. U osnovi, ovaj postupak se sastoji od određivanja promjera najmanje sfere za koju mjerni sustav može definirati promjer, s pogreškom koju je naveo proizvođač CT sustava. Nedostatak ove metode je da u slučaju da rezolucija strukture mjerenja nije poznata. Tada treba mjeriti broj kalibriranih sfera različitih promjera, sve dok se ne pronađe točan promjer koji odgovara strukturnoj rezoluciji [6].

## 4. DIJELOVI CT UREĐAJA

Sustav obuhvaća jedno kućište koje je podijeljeno u dva dijela.

- Gornji dio je komora obložena olovom u kojoj se nalazi izvor rendgenskih zraka, komponente izvora rendgenskih zraka i motorizirani manipulator za pomicanje uzoraka.
- Donji dio uključuje električne kontrole, napajanja, pogon manipulatora, pumpu za hlađenje izvora rendgenskih zraka i vakuum pumpu.

Postoji jedan pristup unutrašnjosti uređaja s prednje vanjske strane sustava, pristupna vrata. Vrata se koriste za postavljanje uzoraka na okretni stol. Vrata na sebi imaju poseban stakleni prozor obložen olovom, tako da operator može sigurno vidjeti unutrašnjost rendgenske komore. Ovisno o dizajnu kućišta, može postojati dodatni ulazni pristup u komoru namijenjen održavanju.



Slika 5. CT sustav Nikon XT H 225

Na slici su vidljive komponente od kojih se sastoji promatrani CT sustav Nikon XT H 225, a to su:

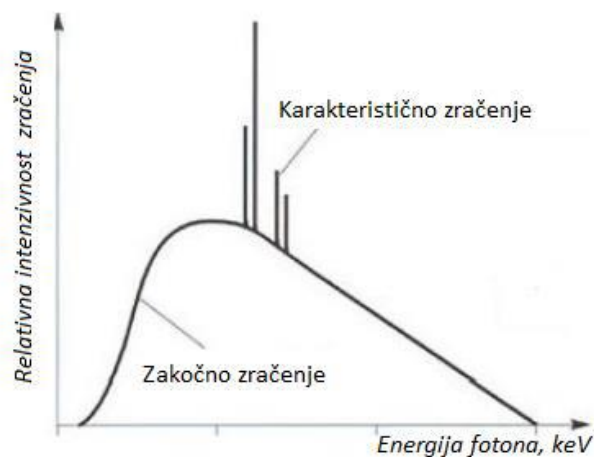
1. Svjetlo za upozorenje
2. Poklopac
3. Ploča za zaustavljanje
4. Vrata uređaja
5. Prozor za promatranje
6. SR4 kontroler.
7. Osobno računalo
8. Pristupna ploča

## **4.1 HARDWARE**

### **4.1.1 IZVOR RENDGENSKIH ZRAKA**

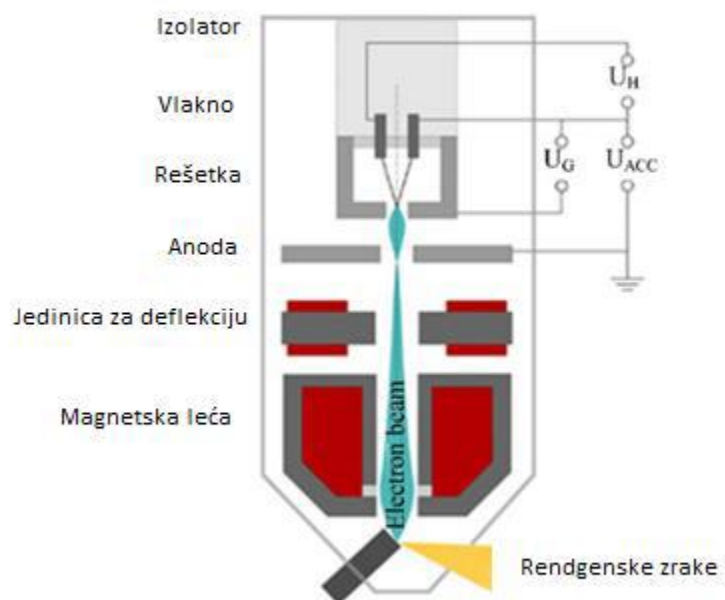
Rendgensko zračenje nastaje kada elektroni velikom brzinom udaraju u metal, pri čemu dolazi do njihovog naglog usporavanja i izbijanja elektrona iz unutarnjih ljuski atoma metala. Dobiveno rendgensko zračenje se sastoji od zakročnog zračenja, s kontinuiranim spektrom intenziteta po različitim valnim duljinama. Izbacivanjem elektrona iz atomskih ljuski nižih energetske razina brzim elektronima koji udaraju u metal, te popunjavanjem tih praznih mjesta elektronima iz viših energetske razina, nastaje rendgensko zračenje sa samo nekoliko valnih duljina, karakterističnih za kemijski element (metal) od kojeg je anoda. To je karakteristično zračenje s linijskim spektrom [3].





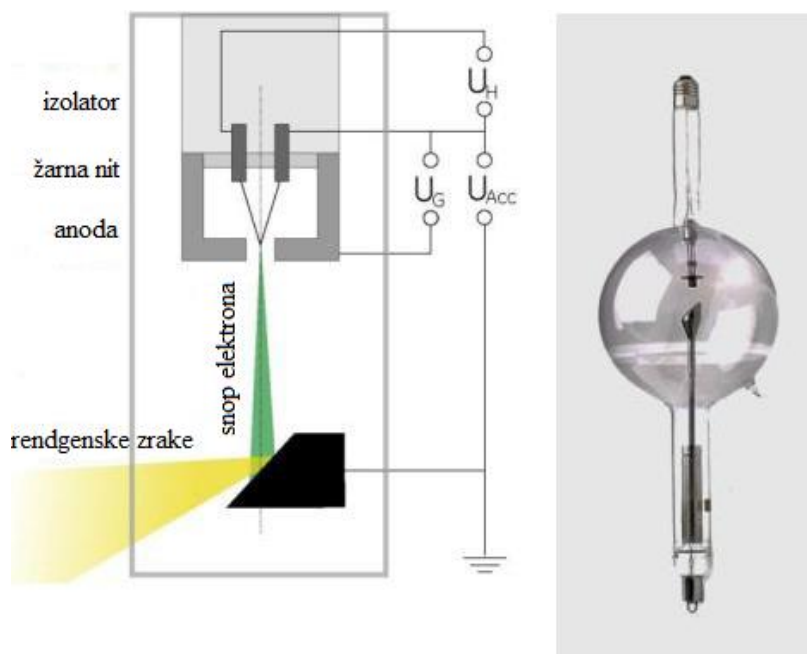
**Slika 6. Spektar rendgenskog zračenja [1]**

Vakuumska cijev za dobivanje rendgenskih zraka sastoji se od izbacivača elektronskih zraka koji se sastoji od katodnog vlakna koje emitira elektrone, anode koja ubrzava elektrone, Wehneltove elektrode za kontrolu elektronskih zraka, te magnetskih deflektora i leća za fokusiranje elektronskih zraka na mjesto gdje će se generirati rendgenske zrake. Prilikom udaranja elektrona s materijalom, brzi elektroni rapidno usporavaju, što za posljedicu ima pretvaranje njihove energije u toplinu (preko 99%) i rendgenske zrake ( $< 1\%$ ).



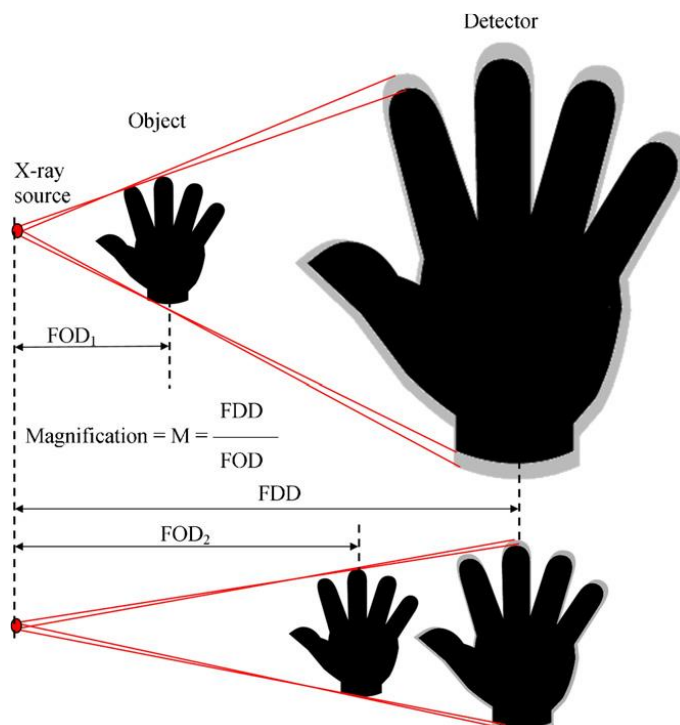
Slika 7. Vakuumska cijev za dobivanje rendgenskih zraka [2]

Prvu vakuumsku cijev za dobivanje rendgenskih zraka izradio je W.D.Coolidge 1913 godine. On je koristio zagrijanu žarnu nit od volframa kako bi nastala elektronska zraka u cijevi s vakuumom [5].



Slika 8. Prva vakuumska cijev za dobivanje rendgenskih zraka [5]

Za dobivanje oštarih slika potreban je mali elektronski snop zraka i mjesto gdje dolaze rendgenske zrake (prikazano na slici 9.)



**Slika 9. Slika povećanja i zamućenja pomicanjem objekta prema izvoru [2]**

Izvori male snage CT-a koriste se za emitiranja tankih predmeta, jer oni ne mogu podnijeti visoke temperature. Izvori visoke snage CT-a su opremljeni s vodenim sustavom za hlađenje. U slučajevima gdje je potrebna visoka preciznost pomoću rotacije predmeta se omogućuje proširenje ulaza topline preko veće površine. U "otvorenim cijevima", operator može sam mijenjati predmet ako je predmet istrošen ili spaljen. Neki izvori imaju svojstvo multi-materijala za predmete koje su napravljeni od različitih materijala i time se omogućuje lakše mjerenje više spektara i postizanje bolje rezolucije slike.

Proizvedeno zračenje rendgenskih zraka se sastoji od "zakočnog zračenja" i "karakterističnog zračenja", a zakočno zračenje je dominantni proizvodni proces rendgenskih zraka. Zakočno zračenje se odvija kada elektron pogodi atomsku jezgru u metu, što rezultira naglo usporavanje elektrona (otuda i njemački izraz *Bremsstrahlung* ili "kočenje zračenja") u emisiji fotona rendgenskog zračenja. Zakočno zračenje daje kontinuirani spektar rendgenskih zraka od vrlo male energije pa sve do razine najveće energije koja nastaje udarom elektrona. Karakteristično zračenje javlja se pri udaru elektrona visoke razine energije i time se pobuđuje unutarnja ljuska

elektrona u atomu predmeta. Nepobuđivanje ili zamjena elektrona (u slučaju da je elektron iz unutarnje ljuske izbačen to radno mjesto popunjava elektron iz više razine energije) dovodi do oslobađanja energije elektrona i fotona karakterističnog zračenja. To se naziva "karakteristika" jer energija zračenja ovisi o materijalu predmeta, a karakterizira ga linija spektra. Proizvedeno zračenje rendgenskih zraka odlikuje se raspodjelom energije (odnosno kvalitetom) i intenzitetom (tokom). Najveća energija rendgenskih zraka prisutna u rendgenskom spektru određuje prodornu snagu snopa rendgenskih zraka u materiju. Intenzitet zračenja rendgenskih zraka je mjera za količinu energije zračenja po jedinici vremena [2].

#### 4.1.2 DETEKTORI RENDGENSKOG ZRAČENJA

Detektori zraka se koriste za mjerenje prijenosa rendgenskih zraka kroz objekt pri bilo kojoj putanji zraka. Njihova funkcija je pretvaranje rendgenskog toka u električni signal, što se zatim može obrađivati sa standardnim tehnikama.

Detektori CT-a koji se danas koriste su ili ravne ploče, koje imaju ekran koji se sastoji od niza dvodimenzionalnih (2D) piksela, ili detektora sa ravnom ili zaobljenom linijom koji se sastoje od jednodimenzionalnih (1D) piksela.



**Slika 10. Detektor u obliku ravne ploče**

Detektor s jednodimenzionalnom linijom ima veću točnost te su otporniji pri većoj energiji rendgenskog zračenja te omogućuju mjerenje debljih predmeta. Unatoč tome, njihovo korištenje je vremenski zahtjevno pošto se mjeri samo jedan odsječak tijekom jedne rotacije objekta i za mjerenje novog odsječka potrebno je pomicanje objekta u smjeru Y-osi. Kod detektora u obliku

ravnih ploča jedna rotacija objekta obično je dovoljna. Mjerenje predmeta visine od 100 mm se provodi mjerenjem rezultata unutrašnje udaljenosti od 100 mm i vrijeme toga mjerenja može biti dulje tisuću puta nego mjerenjem s dvodimenzionalnim detektorom. Iz činjenice da linijski detektori dopuštaju korištenje usmjerenog zračenja rendgenskih zraka proizlazi da su kod linijskih detektora rezultati točniji nego kod detektora s pločama.

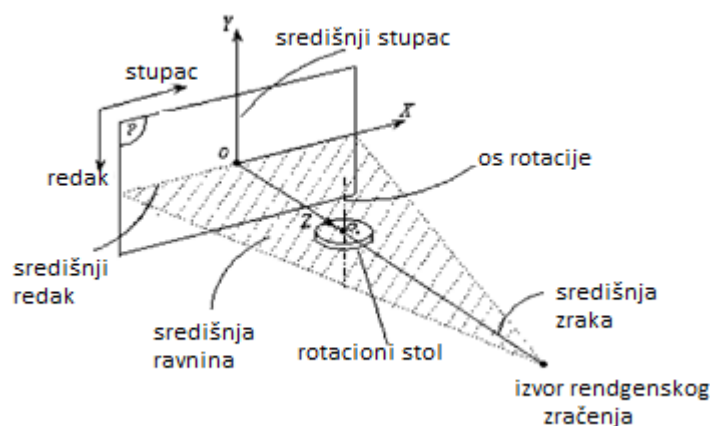


**Slika 11. Detektor u linijskom modelu**

U osnovi postoje tri principa rada detektora, a to se odnosi na to da li je izlaz detektora proporcionalan s ukupnim bojem učinaka fotona (detektori računajućeg tipa), ili je proporcionalan s ukupnom energijom fotona (detektori neizravnog tipa), ili detektor reagira na taloženje energije po jedinici mase (detektori ionizacije). Najuspješniji i najčešće korišteni su neizravni detektori jer se često temelje na amorfnom siliciju [1].

#### **4.1.3 ROTACIJSKI STOL**

Prilikom skeniranja, objekt se dovodi u zahvat na rotacionom stolu. Krivo postavljanje glavnih osi sustava može dovesti do grešaka u skenovima. Idealno postavljanje geometrije sustava prikazano je na slici 12 [2].

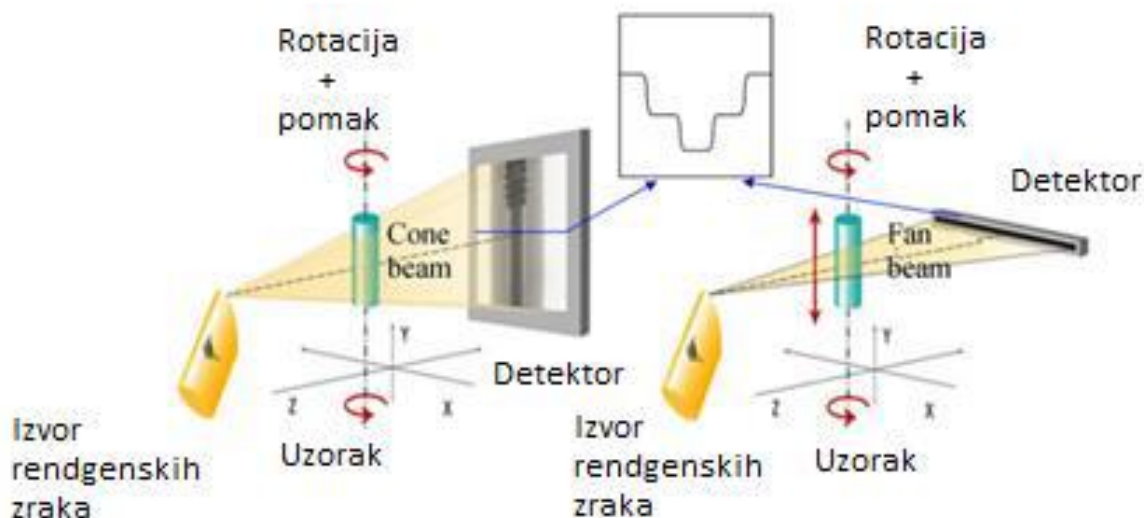


**Slika 12. Postavljanje geometrije sustava prilikom skeniranja [2]**

Središnja zraka presijeca sredinu detektora (točka O); rotacijska os je okomita na središnju ravninu, i središnja ravnina presijeca detektor u središnjem retku. Zbog odstupanja detektora, izvora zraka i rotacionog stola različite greške se mogu pojaviti na snimcima.

#### **4.1.4 KINEMATSKI SUSTAV**

U medicinskom CT sustavu, vakuumski cijev i detektor neprestano rotiraju oko objekta tj. pacijenta, dok je pacijent horizontalno transliran kroz prostor između cijevi i detektora. U industrijskom CT sustavu, cijev i detektor su obično fiksirani, dok objekt snimanja rotira u prostoru između cijevi i detektora, ili bez translacijskog gibanja (kod 2D detektora), ili s vertikalnim pomakom (kod 1D detektora). Osnovni način postavljanja osi na industrijskim skenerima prikazan je na slici.



Slika 13. Postavljanje osi na industrijskim skenerima [2]

Kinematski sustav obično se sastoji od :

- 1) Rotacionog stola za kontinuirano okretanje objekta
- 2) Horizontalne translacijske osi za pozicioniranje objekta između izvora rendgenskog zračenja i detektora ( Z-os). Translacijske osi se često nazivaju osi uvećanja jer većim geometrijskim povećanjem se postiže smještanje objekta bliže izvoru. Povećavanjem se postiže i negativni učinak jer povećanjem rezolucije slike ona postaje mutna.
- 3) Horizontalne translacijske osi u smjeru osi X da se stol, tj. objekt pomiče paralelno s detektorom. Ova translacijska os omogućuje pozicioniranje objekta u, ali i izvan područja mjerenja.
- 4) Vertikalne translacijske osi koja pomiče stol i objekt ( ili izvor i detektor). Kada se koriste 2D ravne ploče, ova os se koristi za pozicioniranje objekta u mjernom području.

Komponente uređaja trebaju imati visoku točnost i stabilnost ( geometrijsku i toplinsku) jer one utječu na ishod mjerenja. Pogrešno pozicioniranje rotacionog stola, kvaliteta rotacije, pogrešno pozicioniranje Z-osi mogu izravno utjecati na izmjerene dimenzije. Dodatna os translacije može

se dodati na izvor (ali i na detektor) kako bi se zadovoljile specifične potrebe, ali i povećala fleksibilnost uređaja [2].

## 4.2 SOFTWARE

### 4.2.1 SOFTWARE ZA REKONSTRUKCIJU I DETEKCIJU RUBOVA

Osim hardware-a CT i software ima važnu ulogu, posebno za rekonstrukciju modela koja nastaje sklapanjem slika u 2D projekcijama. Rekonstrukcija se obično odvija preko filtrirane projekcije unatrag, koja je bazirana na linearnoj integralnoj transformaciji; matematičkom modelu kojeg je razvio J. Radon 1917. godine. Ulazne varijable u rekonstrukciji su profili sivih vrijednosti, koji predstavljaju razvoj intenzivnosti po pikselima koji se nalaze na jednoj liniji detektora (npr. pikseli koji leže u XZ dijelu objekta). U slučaju korištenja konusnog izvora rendgenskih zraka, treba uzeti u obzir da vokseli ne ostaju u istoj horizontalnoj ravnini prilikom rotacije objekta. U tom slučaju rekonstrukcija se bazira na Feldkampovom algoritmu. Ovakav način rekonstrukcije je osjetljiv na horizontalno odstupanje od izvora, rotacijske osi i detektora, te je potrebno često podešavanje i prikladno uklanjanje grešaka.

Nakon rekonstrukcije se detektiraju rubovi ili se obavlja segmentacija čime se određuju sučelja između čvrstog materijala i okružujućeg zraka, ili između različitih čvrstih materijala. Pomoću detekcije rubova 3D voksel podaci se prevode u podatke o 3D površini. Postoje razne metode kojima se određuju rubovi objekta :

- Dodjeljivanje vrijednosti praga za rubne voksele
- Interpolacija između vrijednosti sivila voksel
- Traženje maksimalne derivacije vrijednosti sivila
- Traženje središnje vrijednosti sivila između razina svijetlih zračnih voksel i tamnih voksel materijala

Metoda praga bitno utječe na razlučivost. Očvršnuće rendgenskih zraka (eng. *Beam hardening*) i ostale greške/artefakti mogu smetati u točnoj detekciji rubova, pošto mijenjaju vrijednost sivila rubnih piksel [2].



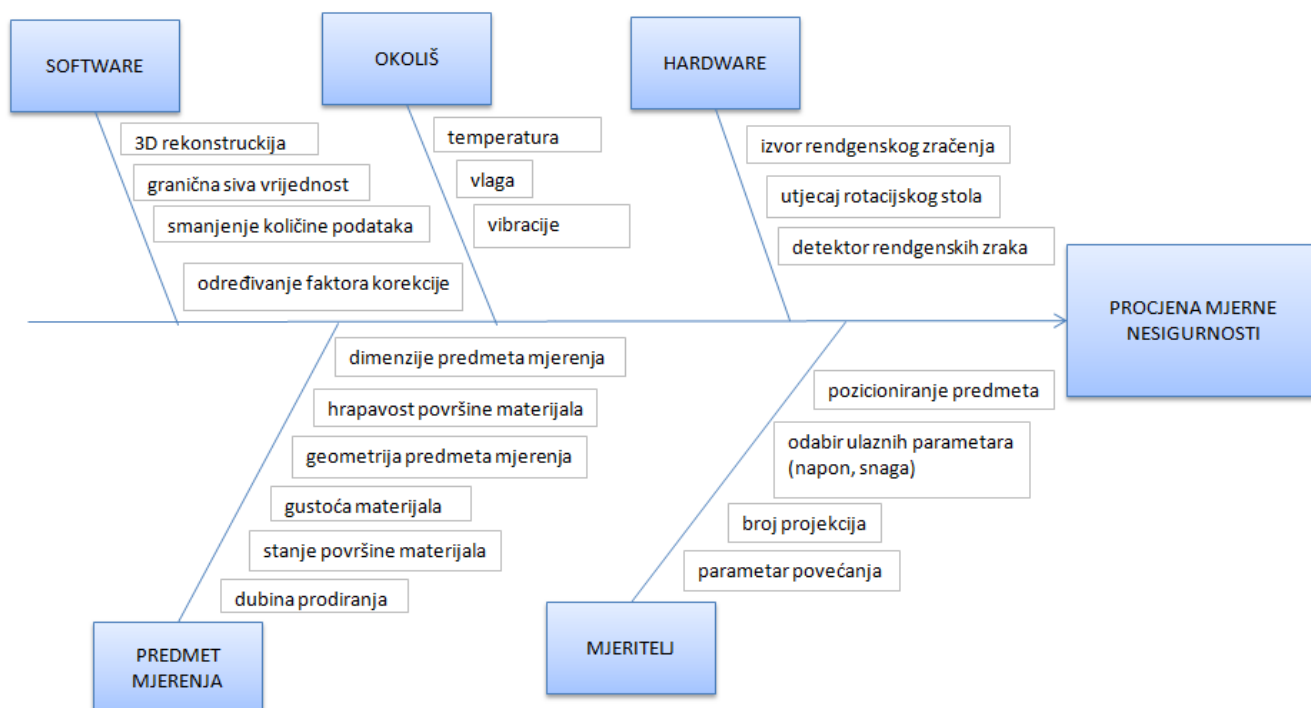
#### **4.2.2 SOFTWARE ZA DIMENZIONALNA MJERENJA**

Dok se software za 3D rekonstrukciju koristi u svim CT uređajima, dimenzionalni CT uređaji zahtijevaju dodatan software za izvlačenje geometrijskih podataka (kao što su ravnine, cilindri, kugle, itd.) i računanje geometrijskih podataka (pozicija, orijentacija, dimenzije, duljina, promjer, kut, mjerna nesigurnost, itd.). Dimenzionalna analiza često traži različite korake u obradi podatka :

- Pretvaranje u oblak točaka
- Geometrijske značajke CAD modela na kojima se može provesti dimenzionalna analiza

To iziskuje posebnu obradu podataka i poseban softver za analizu. Softver bi trebao biti u mogućnosti podržavati većinu dimenzionalnih mjerenja u tradicionalnim CMM softverskim paketima [1].

## 5. UTJECAJNI PARAMETRI



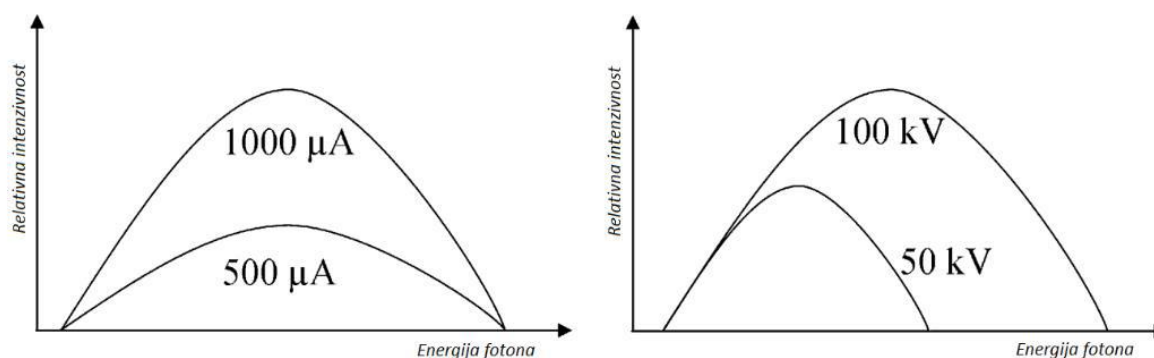
Slika 14. Ishikawa dijagram utjecajnih parametara CT uređaja [7]

### 5.1 SNAGA RENDGENSKOG ZRAČENJA

Snaga izvora rendgenskih zraka ovisi o jakosti električne struje i naponu koji se daju elektronskim zraka koje udaraju u metu i stvaraju rendgenske zrake. Jakost električne struje ( $\mu\text{A}$ ) jednaka je brzini prijenosnika naboja (npr. elektronima) koji teku od vlaknastog izvora do mete. To direktno utječe na intenzivnost rendgenskog zračenja (veličinu radijacijske energije), no ne i na kvalitetu rendgenskih zraka (snagu prodiranja). Napon (kV) utječe na raspodjelu energije (maksimalni napon, kvalitetu, prodiranje) i na intenzivnost (količinu rendgenskih zraka). Na kvalitetu utječe zbog toga što napon određuje najveću energiju fotona a time i snagu prodiranja.

Odabir primjerenog napona i jakosti struje za svako mjerenje predstavlja težak zadatak. Napon bitno mijenja spektar rendgenskog zračenja produljujući ga do iznosa postavljenog napona, a s time dolaze i nove specifične amplitude zračenja u spektru. Birajući postavke potrebno je uzeti u obzir i materijal ispitivanog predmeta, gustoću i geometriju. Oblik objekta, veličina i struktura

materijala se mogu puno razlikovati ovisno o kojem se objektu radi u dimenzionalnom CT mjeriteljstvu, za razliku od medicinskog CT-a gdje je objekt uvijek čovjek. To često dovodi do kontradiktornih graničnih uvjeta. Napon bi trebao biti dovoljno velik da se izbjegne nestajanje rendgenskih zraka u smjeru gdje se prodire najveća koncentracija materijala, no isto tako to može dovesti do gubitka u kontrastu snimka ili zasićenja detektora u smjeru gdje je manja koncentracija materijala [2].



Slika 15. Utjecaj jakosti struje i napona na intenzivnost [2]

## 5.2 METODE SKENIRANJA

Načini na koje se skeniranje može obaviti su cjelovito skeniranje, djelomično skeniranje (skeniranje samo određenog područja interesa), uvećavanje ili detekcija rubova. Za korištenje CT danas se primjenjuju dvije glavne strategije skeniranja, a to su:

- rotacijsko konusno skeniranje - objekt je tijekom jednog okreta mjerenja uvijek unutar konusa rendgenskih zraka
- *slice-wise* skeniranje - objekt se skenira preko odsječaka ograničene debljine tijekom svakog okretanja objekta

Od ostalih metoda značajna je i metoda *step-wise* rotacije objekta koja može biti izvedena stupnjevito ili kontinuirano. S nešto dužim vremenom mjerenja ovom metodom se postižu slični rezultati. Ako se za skeniranje koristi veća brzina skeniranja (npr. 1 rotacija/min) ostvari se kontinuirana rotacija sa zamućenim kretnjama i slikom [2].

## 6. MJERNI ASPEKTI

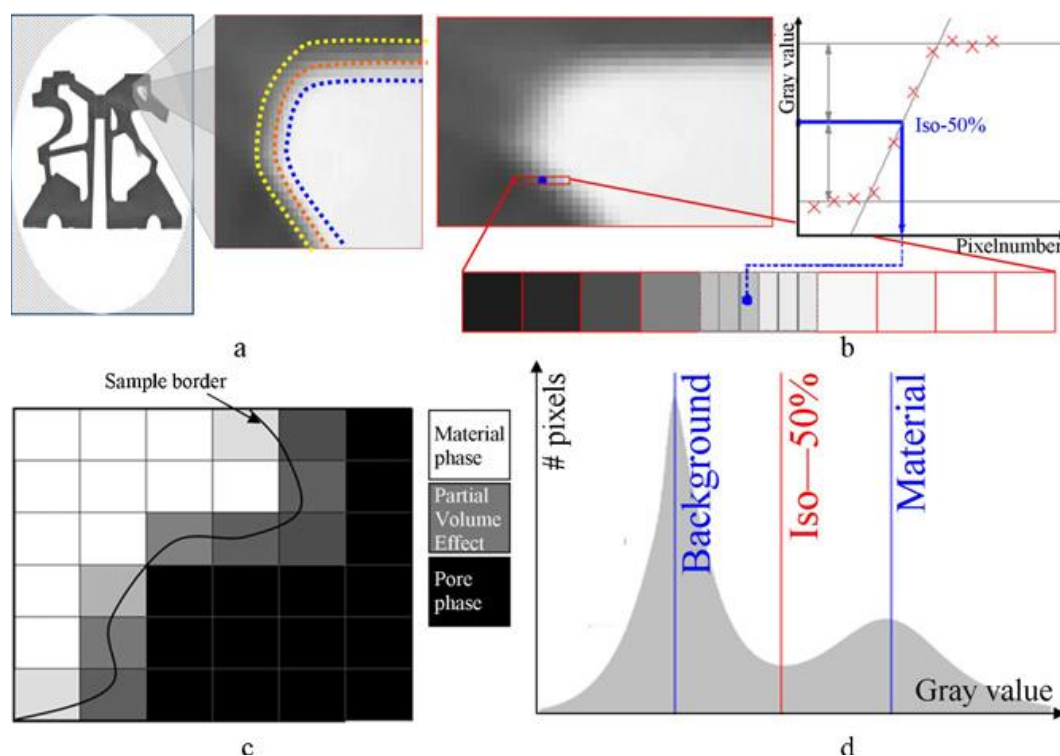
### 6.1 TOČNOST ASPEKTA

Točnost mjerenja je pod utjecajem:

- točnosti dvodimenzionalnih slika rendgenskog zračenja - pod utjecajem veličine detektora piksela, uvećanja, oštine i kontrasta 2D slike
- točnosti rekonstrukcije 2D slika u 3D modele - ovisi o točnosti algoritma rekonstrukcije, veličini vokselu, zračenju, točnosti detekcije površine
- grešaka koje se događaju pri pretvaranju dimenzionalnih mjerenja u 3D modele - ovise o lokaciji i broju točaka korištenih za identifikaciju mjernog i lokalnog koordinatnog sustava

### 6.2 DETEKCIJE RUBOVA

Budući da je detekcija rubova jedan od bitnih problema, u mjeriteljstvu pomoću CT-a, zbog toga što ima veliki utjecaj na točnost i sljedivost on se i dalje razvija i unaprjeđuje. U medicini i ispitivanju materijala detekcija rubova se često temelji na graničnom iznosu sivila, a pretpostavlja se da se neke sive vrijednosti podudaraju s prijelazom iz jednog materijala u drugi. Rub sive vrijednosti je bitno ovisan o materijalu koji je ozračen i o intenzitetu zračenja. Uobičajena metoda za identifikaciju praga sive vrijednosti, koja manje ovisi o intenzitetu zračenja, je "*iso - 50 %*" vrijednost. Ova vrijednost se dobiva iz histograma koji određuje broj vokselu u odnosu na intenzitet vokselu ili sive vrijednost (vidi sliku 16.).



Slika 16. Detekcija ruba i graničnog iznosa sivila [1]

Histogram prikazuje vrh podudaranja sa svakim od ozračenih materijala (uključujući i okolni zrak). *Iso - 50 %* znači da se uzima srednja siva vrijednost između vrhova graničnih vrijednosti. Vrhovi se mogu uvelike razlikovati, a to ovisi o broju voksela koje sadrži zrak ili pojedini materijal. Testovi za potvrdu kalibracije objekata su pokazali da su rezultati praga *iso - 50%* graničnog iznosa sivila često pomaknuti s obzirom na stvarni rub materijala. Testovi koji su se provodili u K.U.Leuven pokazali su da je prag 50% graničnog iznosa sivila često premalen za dijelove od aluminija (optimalna vrijednost praga je oko 35 - 45 %, tj. bliža je sivoj vrijednosti zraka). Nekoliko CT simulacija za programske pakete su razvijene s ciljem kako bi se identificirale odgovarajuće CT postavke (struja, napon, filter ...), ali ne i odgovor na komplicirani problem koji izaziva granični iznos sivila [1].

## 7. XCT UMJERAVANJE I PROVJERAVANJE SUSTAVA

Kalibracija i verifikacija su dva procesa koji se koriste za procjenu sustava mjerenja. Kalibracija je radnja kojom se pod određenim uvjetima u prvome koraku uspostavlja odnos između vrijednosti veličine s mjernim nesigurnostima koje daju mjerni etaloni i odgovarajućih pokazivanja kojima su pridružene mjerne nesigurnosti, a u drugome koraku ti se podaci upotrebljavaju za uspostavljanje odnosa za dobivanje mjernog rezultata iz pokazivanja [9].

Verifikacija je analogna kalibraciji, ali se rezultat koji ne/zadovoljava pokazuje da li je uređaj unutar određenih specifikacija koje propisuje proizvođač uređaja.

### 7.1 XCT SUSTAV VERIFIKACIJE

Kriterij prihvaćanja se odnosi na to da li je greška duljine i ponovljivosti, s obzirom na nesigurnost, unutar dopuštenog odstupanja koje je naveo sam proizvođač uređaja (MPE *eng. Maximum permissible error*). Trenutno ne postoji međunarodni standard koji pruža sveobuhvatne smjernice za verifikaciju sustava za XCT. Iako je XCT veoma učinkovit sustav, njegov rad nije jednostavan u odnosu na konvencionalne optičke sustave. Pogreške vezane za mjerenje su drugačije prirode u odnosu na konvencionalne sustave mjerenja [1].

### 7.2 MEĐUNARODNI STANDARDI ZA XCT TEHNOLOGIJU

Iako ne postoji službena objavljena međunarodna norma koja se odnosi na umjeravanje i provjeru XCT sustava postoje niz standarda vezanih za XCT tehnologije prikaze na tablici 1.

**Tablica 1. Međunarodni standardi za XCT tehnologiju [1]**

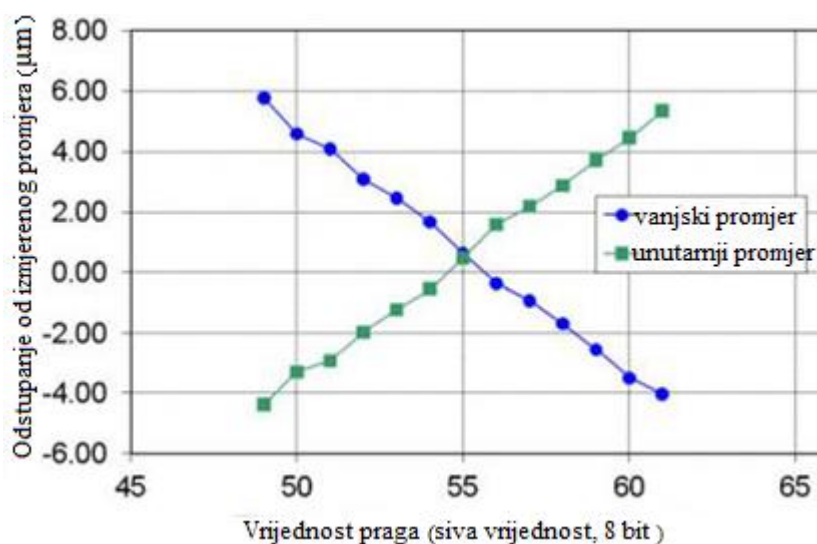
Standard	Naslov
ISO 15708 - 1	<i>Non-destructive testing - Radioation methods-CT - Part1: Principles</i>
ISO 15708 - 2	<i>Non-destructive testing - Radioation methods - CT - Part2: Examination practices</i>
ISO/TC 213 WG10	<i>Geometrical product specifications(GPS) - Acceptance and reverification tests for coordinate measuring machines(CMM) - CT</i>
ASTM E 1695	<i>Standard test method for measurement of CT system performance</i>
ASTM E 1441	<i>Standard guide for CT imaging</i>
ASTM E 1570	<i>Standard practice for CT examination</i>

Međunarodni standardi ISO 15708-1 i ISO 15708-2 su najvažniji dokumenti jer pružaju jasan popis tehnologije koja pokriva većinu uobičajenih pojmova s kojima se susreće u XCT tehnologijama. Oba dokumenta su strukturirani na sličan način, a uključuju rezoluciju XCT sustava, uređaja, matematičku pozadinu, tumačenje rezultata i raspravu o preciznosti i točnosti.

Općenito govoreći postojeći međunarodni standardi uglavnom pokrivaju teoriju i terminologiju vezanu za XCT tehnologiju. Neki standardi se uvode u eksperimentalni rad, ali ne postoji sveobuhvatna odrednica za kalibraciju i provjeru sustava [1].

### 7.3 REFERENTNI OBJEKTI

Utjecaj graničnog iznosa sivila (*eng. Threshold*) na izračun promjera zbog varijacija praga vrijednosti je prikaz na slici dolje. Važno je napomenuti da promjeri unutarnjeg i vanjskog cilindra ovise o promjeni graničnog iznosa sivila, čime se povećava promjer unutarnjeg cilindra, a smanjuje promjer vanjskog cilindra. Prikazano je da će određivanje pogrešne vrijednosti graničnog iznosa sivila rezultirati sustavnim pomakom u izračunu položaja objekta [1].



Slika 17. Utvrđivanje graničnog iznosa sivila [1]



## 8. USPOREDBA MJERENJA RAZLIČITIM METODAMA

U području mjerenja prisutni su brojni načini mjerenja od kojih se najviše ističu trokoordinatni mjerni uređaji (CMM), optički mjerni uređaji i računalna 3D tomografija.

Neprestani razvoj tržišnih potreba doveo je do novih spoznaja i mogućih rješenja u području kontrole kvalitete. Danas se u većini slučajeva kontrola geometrije u industriji provodi korištenjem uređaja s ugrađenom mogućnosti trokoordinantnog mjerenja. Već nekoliko godina na tržištu postoji i mjerenje na principu računalne 3D tomografije pomoću rendgenskih zračenja. To je i najnovije polje za trokoordinantnu tehniku mjerenja jer omogućuje raznu primjenu.

Uspoređuju se rezultati usporednih testova provedenih na trokoordinantnim mjernim uređajima (CMM), optičkim mjernim sustavima i računalnom tomografijom 3D. Na temelju rezultata nameće se zaključak da računalna tomografija omogućuje dobivanje boljih rezultata nego onih koji su dobiveni mjerenjem s CMM-om i optičkim mjernim sustavima. Provedena istraživanja zorno pokazuju područja gdje je uporaba pojedinih sustava bolja od ostalih jer nije svaki uređaj prikladan za sva mjerenja. Jedan od razloga je taj što se kod taktilnog trokoordinantnog uređaja (CMM) javlja praznina informacija između točaka dodira. Kod optičkog mjernog uređaja je problem pristupnosti jer on ne može prikupiti podatke za rupe malog promjera, što uzrokuje pogreške u procjeni položaja. Slika kod CT uređaja omogućuje uvid u kompletnu geometriju promatranog objekta (unutarnju i vanjsku), ali pruža i uvid u pojavu pora na unutrašnjosti objekta. [5]

Na slici 18. prikazani su usporedni rezultati mjerenja pojedinih točaka i kuteva između pojedinih ravnina. Razlika u mjerenju pojedinih točaka koordinatnog sustava i promjera za unutrašnju površinu nije toliko velika jer odstupanje kod sve tri tehnologije je poprilično jednako. Jedna od prednosti računalne tomografije, u odnosu na ostale dvije metode, jest pri mjerenju kuteva između ravnina jer je odstupanje od nominalnih vrijednosti najmanje upravo kod mjerenja pomoću računalne tomografije.

### Mjerenje koordinata i promjera za unutrašnju površinu

#### Izmjerena vrijednost

Nominalna vrijednost (mm)		(mm)	Odstupanje (mm)
CMM		X = 2.502	X = 0.002
		Y = 2.501	Y = 0.001
		Z = -0.012	Z = -0.012
		Ø = 4.259	Ø = 0.259
Optical scanner	X = 2.5	X = 2.529	X = 0.029
	Y = 2.5	Y = 2.512	Y = 0.012
	Z = 0.0	Z = -0.058	Z = -0.058
	Ø = 4.0	Ø = 4.252	Ø = 0.252
CT scanner		X = 2.515	X = 0.015
		Y = 2.505	Y = 0.005
		Z = -0.062	Z = -0.062
		Ø = 4.265	Ø = 0.265

### Mjerenje kuteva između ravnina

#### Izmjerena vrijednost

Nominalna vrijednost (°)		(°)	Odstupanje(°)
CMM		α 1-2 = 90.048	α 1-2 = 0.048
		α 2-3 = 59.690	α 2-3 = -0.310
Optical scanner	α 1-2 = 90.0	α 1-2 = 90.057	α 1-2 = 0.057
	α 2-3 = 60.0	α 2-3 = 59.881	α 2-3 = -0.119
CT scanner		α 1-2 = 90.057	α 1-2 = 0.057
		α 2-3 = 60.008	α 2-3 = 0.008

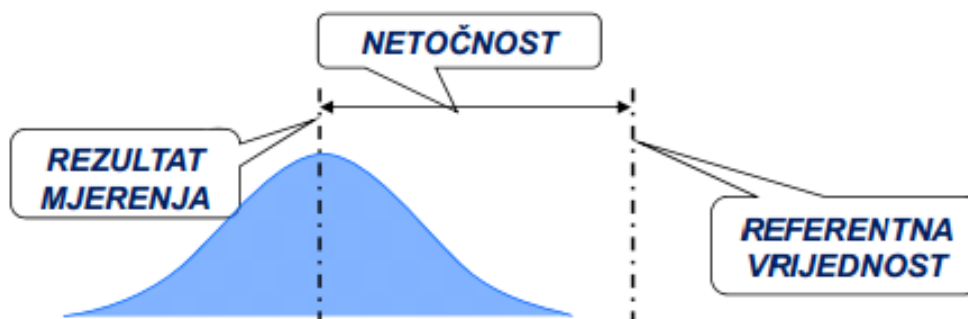
Slika 18. Usporedba točnosti rezultata mjerenja promjera i kuteva različitih tehnika [5]

U pogledu opisa izmjerene površine optički mjerni uređaj je bolji od CMM-a. Također, optički mjerni sustav omogućuje mjerenje cijele površine pa čak i elemente s vrlo složenim oblicima i geometrijom. Točnost mjerenja kod optičkog mjernog uređaja ovisi o sustavu koji se koristi i rezoluciji mjerne matrice. Ograničenje za optički mjerni uređaj je nedostatak mogućnosti mjerenja unutarnjih površina (npr. duboki utori) i manja je točnost mjerenja u odnosu na trokoordinatni mjerni uređaj (CMM). Takvi problemi nisu prisutni tijekom mjerenja pomoću računalne tomografije (CT) jer ona omogućava mjerenje i unutarnje i vanjske površine. Ograničenja kod računalne tomografije su vezana za veličinu objekta koji se mjeri i količine apsorpcije zračenja. Za veće predmete trebalo bi koristiti CT uređaj s većom snagom, ali to onda dovodi do smanjenja točnosti samog mjerenja [5].

## 9. KLASIFIKACIJA POGREŠAKA MJERNOG SUSTAVA

### 9.1 NETOČNOST

Netočnost je razlika između dobivenog rezultata mjerenja i referentne vrijednosti (prave vrijednosti).

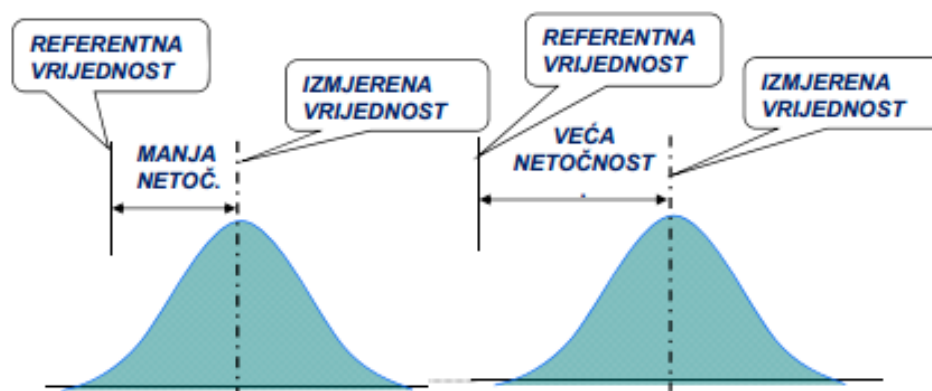


Slika 19. Netočnost [3]

Referentna vrijednost je vrijednost koja služi kao dogovorena referenca za mjernu vrijednost, a može biti utvrđena na osnovi srednje vrijednosti rezultata više mjerenja provedenih mjernom opremom više razine točnosti.

### 9.2 LINEARNA POGREŠKA

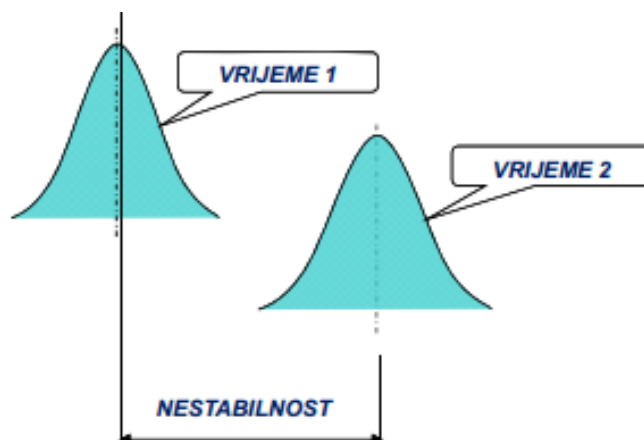
Linearna pogreška je stalna promjena u netočnosti unutar određenog dijela mjernog područja instrumenata.



Slika 20. Linearna pogreška [3]

### 9.3 NESTABILNOST

Nestabilnost je ukupna varijacija dobivenih rezultata mjerenja iste karakteristike tijekom dužeg vremenskog razdoblja.



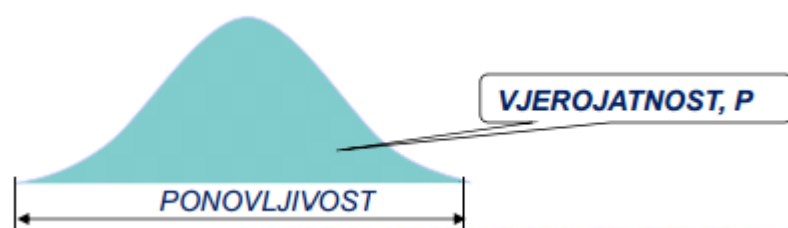
Slika 21. Nestabilnost [3]

### 9.4 PONOVLJIVOST

Ponovljivost je usko slaganje između rezultata uzastopnih mjerenja iste mjerene veličine izvedenih u istim mjernim uvjetima koji uključuju:

- isti mjerni postupak
- isti mjeritelj
- isto mjerilo upotrebljavano u istim uvjetima
- isto mjerno mjesto
- ponavljanje u kratkom vremenu

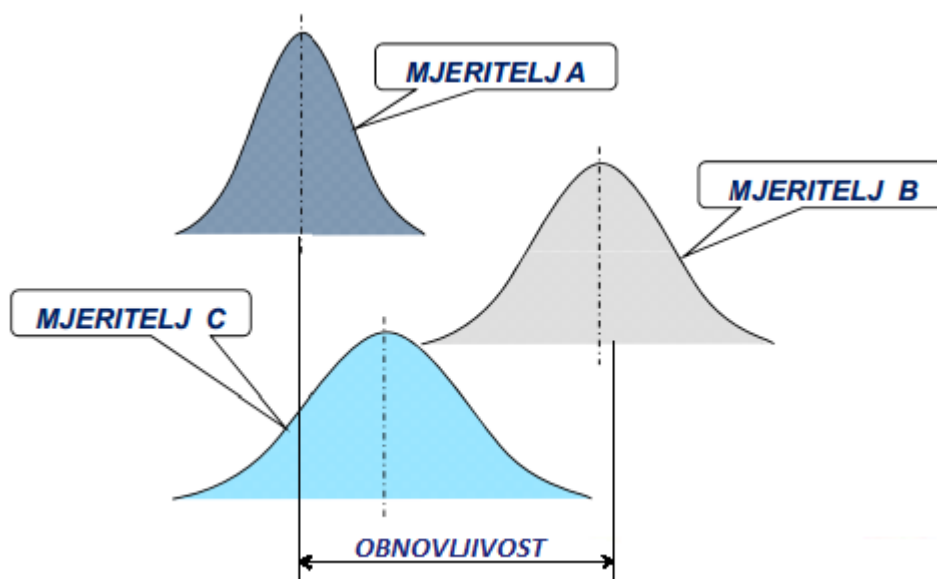
Ponovljivost određuje utjecaj mjerila u varijaciji mjernog sustava. Mjerna vrijednost ponovljivosti je vrijednost unutar koje se može očekivati da leži razlika između dvaju pojedinačnih rezultata mjerenja dobivena uz uvjete ponovljivosti, uz vjerojatnost od 95 %.



Slika 22. Ponovljivost [3]

## 9.5 OBNOVLJIVOST

Obnovljivost je rasipanje rezultata mjerenja dobiveno od strane većeg broja mjeritelja pri višestrukom mjerenju iste karakteristike na istim dijelovima uz korištenje istog ili različitog mjernog instrumenta.

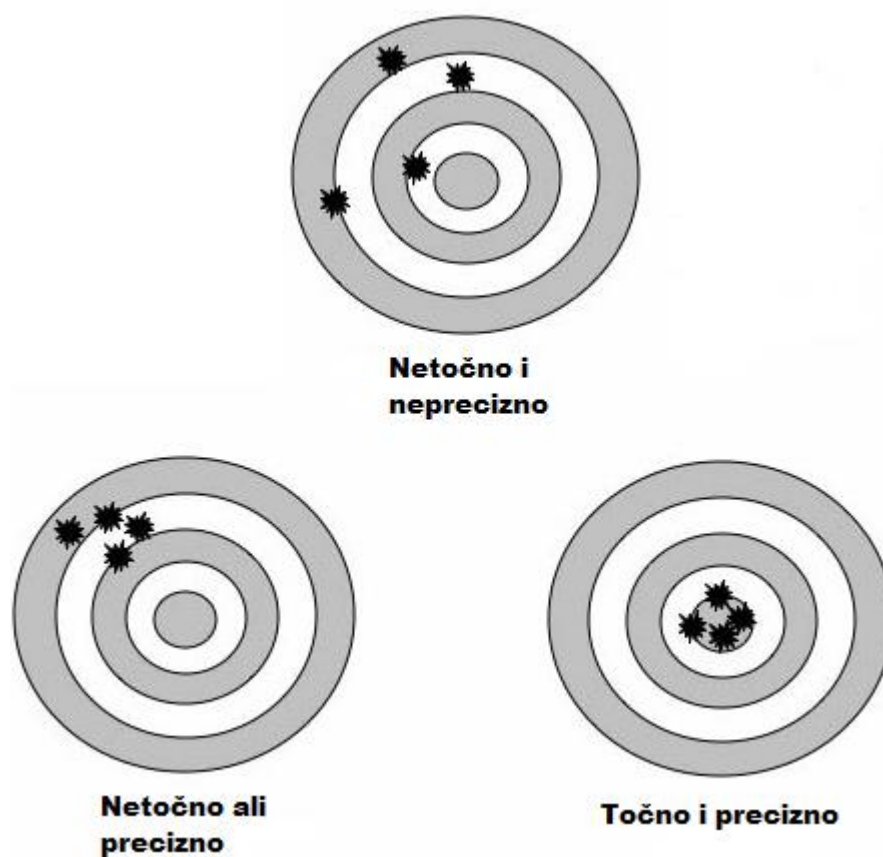


Slika 23. Obnovljivost [3]

Obnovljivost u najvećoj mjeri određuje utjecaj mjeritelja u varijaciji mjernog sustava. Mjerna vrijednost obnovljivosti je vrijednost unutar koje se može očekivati da leži apsolutna razlika između dvaju rezultata mjerenja, dobivena uz uvjete obnovljivosti te uz vjerojatnost 95 %.

## 9.6 TOČNOST I PRECIZNOST

Potrebno je razlikovati točnost od preciznosti tijekom mjerenja. Točnost je bliskost pravoj mjeri ili prihvaćenoj referentnoj vrijednosti, a preciznost je bliskost očitavanja ponovljenih mjerenja. Preciznost je usko vezana sa ponovljivosti, a na slici se vidi usporedba točnosti i preciznosti za lakše razumijevanje.



Slika 24. Usporedba točnosti i preciznosti [3]

## 10. NUMERIČKA ANALIZA MJERENJA SUKLADNO NORMI ISO 5725:1994

Osnovna svrha metoda za mjerenje je da se kroz statističke postupke procijene točnost i preciznost rezultata te odgovori na pitanje jesu li rezultati mjerenja ponovljivi i obnovljivi. Važno je napomenuti da se analize mogu primijeniti na rezultate mjerenja unutar laboratorija i između laboratorija pa stoga razlikujemo unutar-laboratorijska i među-laboratorijska mjerenja.

### 10.1 MJERITELJSKI POJMOVI

**Mjerna vrijednost ponovljivosti  $r$**  je vrijednost unutar koje se može očekivati da leži razlika između dvaju pojedinačnih rezultata mjerenja dobivena u uvjetima ponovljivosti, uz vjerojatnost  $P$  (najčešće 95 %).

**Kritična razlika ponovljivosti  $CrDr$**  je vrijednost unutar koje se može očekivati da leži razlika dvaju pojedinačnih rezultata ispitivanja dobivena u uvjetima ponovljivosti sa specificiranom vjerojatnosti.

**Mjerna vrijednost obnovljivosti  $R$** , je vrijednost unutar koje se može očekivati da leži apsolutna razlika između dvaju rezultata mjerenja, dobivena u uvjetima obnovljivosti, uz vjerojatnost  $P$  (najčešće 95 %).

**Kritična razlika obnovljivosti  $CrDr$**  je vrijednost unutar koje se može očekivati da leži apsolutna razlika između dvaju rezultata ispitivanja, dobivena u uvjetima obnovljivosti sa specificiranom vjerojatnosti.

Posebna primjena mjerne ponovljivosti i obnovljivosti je u usporedbenim mjerenjima između laboratorija, kako bi se usporedila preciznost i točnost rezultata mjerenja [12].

## 10.2 METODE ZA ANALIZU MJERENJA

Postoji veliki broj metoda pomoću kojih se analiziraju rezultati mjerenja. U nastavku je opisano nekoliko metoda koje su dodatno objašnjene. Općenito se metode mogu podijeliti na grafičke i numeričke te svaka od njih ima svoje prednosti i nedostatke. Kod grafičkih metoda se pronalaze grube greške u mjernom nizu i najveća prednost je što se dobiveni rezultati mogu prikazati grafički. U tablici 2 prikazan je matrični model mjernih nizova koji se provode na isti način unutar laboratorija i između laboratorija [13].

Testovi koji se koriste kod grafičkih metoda su [13]:

- Mandelin  $k$ -test
- Mandelin  $h$ -test

Testovi koji se primjenjuju kod numeričkih metoda su [13]:

- Cochranov test
- Grubbsov test

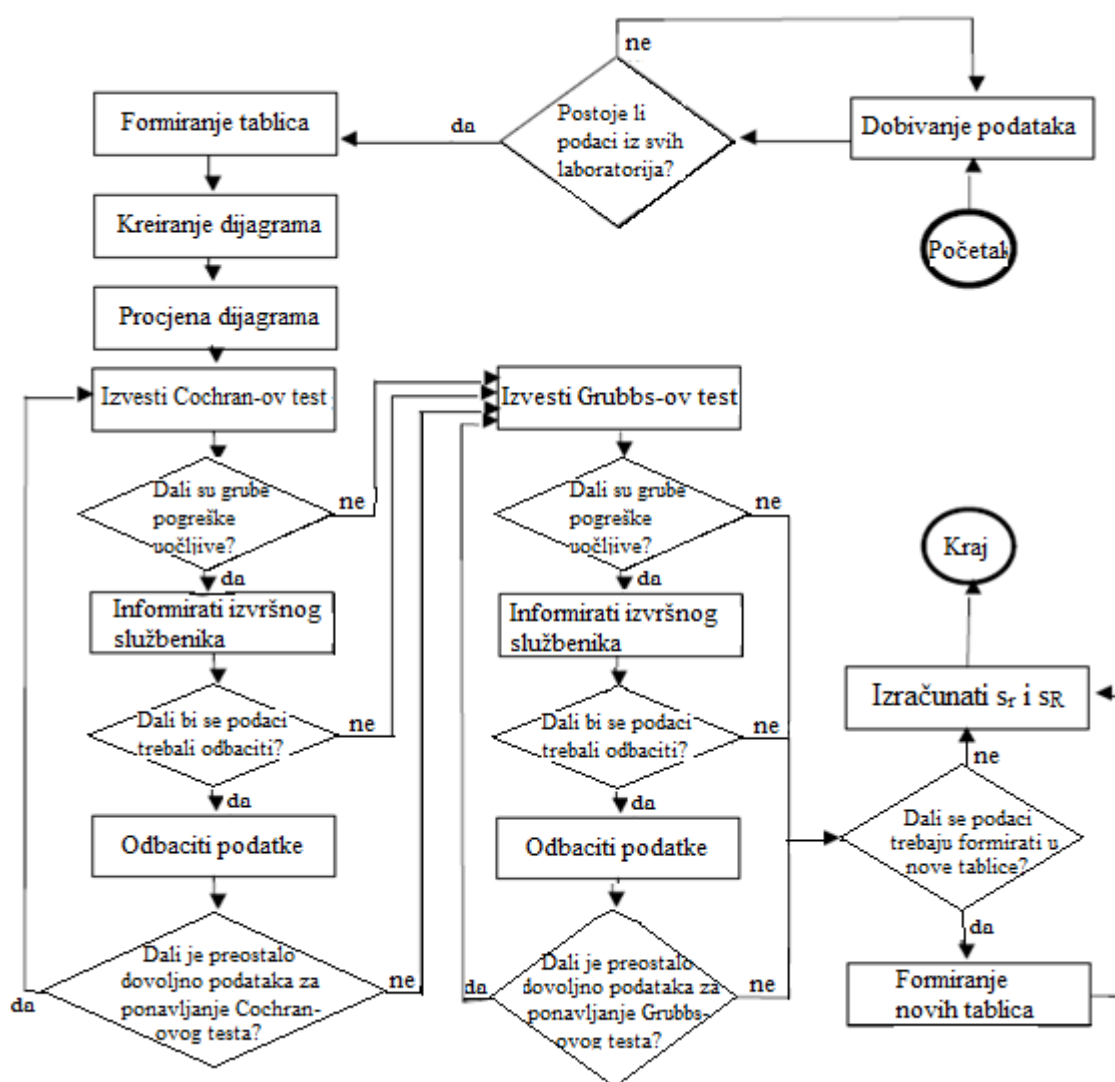
**Tablica 2. Matrični model mjernih nizova [12]**

br. niza. $i$ br. mjerenja. $j$	1	2	... $i$ ...	$m-1$	$m$
1	$x_{11}$	$x_{21}$	$x_{i1}$	$x_{(m-1)1}$	$x_{m1}$
2	$x_{12}$	$x_{22}$	$x_{i2}$	$x_{(m-1)2}$	$x_{m2}$
...	...	...	...	...	...
$j$	$x_{1j}$	$x_{2j}$	$x_{ij}$	$x_{(m-1)j}$	$x_{mj}$
...	...	...	...	...	...
$n-1$	$x_{1(n-1)}$	$x_{2(n-1)}$	... $x_{i(n-1)}$ ...	$x_{(m-1)(n-1)}$	$x_{m(n-1)}$
$n$	$x_{1n}$	$x_{2n}$	... $x_{in}$ ...	$x_{(m-1)n}$	$x_{mn}$
$\bar{x}$					
$s_j$					



### 10.2.1 NUMERIČKE MOETODE

Tipični predstavnici numeričkih metoda za određivanje grubih pogrešaka su Cochranov i Grubbsov test. Ovi testovi mogu poslužiti za istraživanje kada statistički grube pogreške i/ili lutajuće pogreške mogu biti objašnjene nekom tehničkom pogreškom ( propust u izvođenju mjerenja, greška u računanju, administrativna pogreška u prepisivanju rezultata mjerenja, obrada krivog uzorka). Na slici 25. prikazan je dijagram toka pomoću kojeg se može vidjeti postupak provođenja numeričkog ispitivanja grubih pogrešaka.

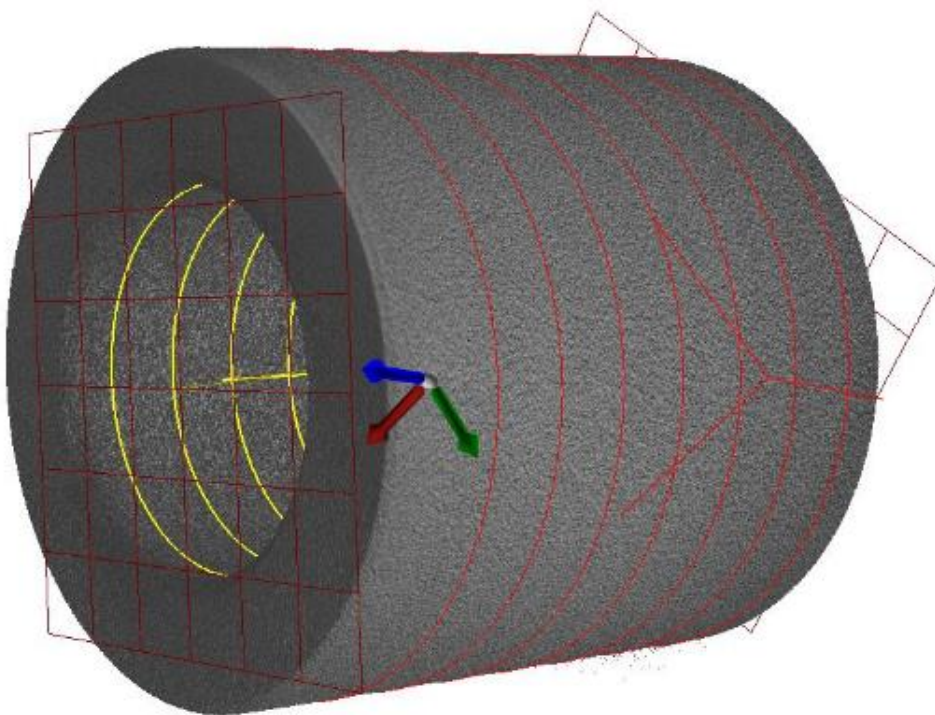


Slika 25. Dijagram toka kod numeričkog ispitivanja grubih pogrešaka [13]

Pri obavljanju ispitivanja za grube pogreške treba shvatiti da grube pogreške ne bi trebale biti odbačene samo iz statističke točke gledišta. Za svaki uzorak kod kojeg je rezultat različit od ostalih, treba tražiti razlog zašto je drugačiji od ostalih. Testovi za ispitivanje grubih pogrešaka pokazuju ima li dovoljno statističkih pokazatelja da se pojavila gruba pogreška. Ti testovi neće navesti zašto se to dogodilo. To se može utvrditi tek nakon temeljitog istraživanja, te se onda može odlučiti da li podaci trebaju biti deklarirani kao grube pogreške i odbačeni [13].

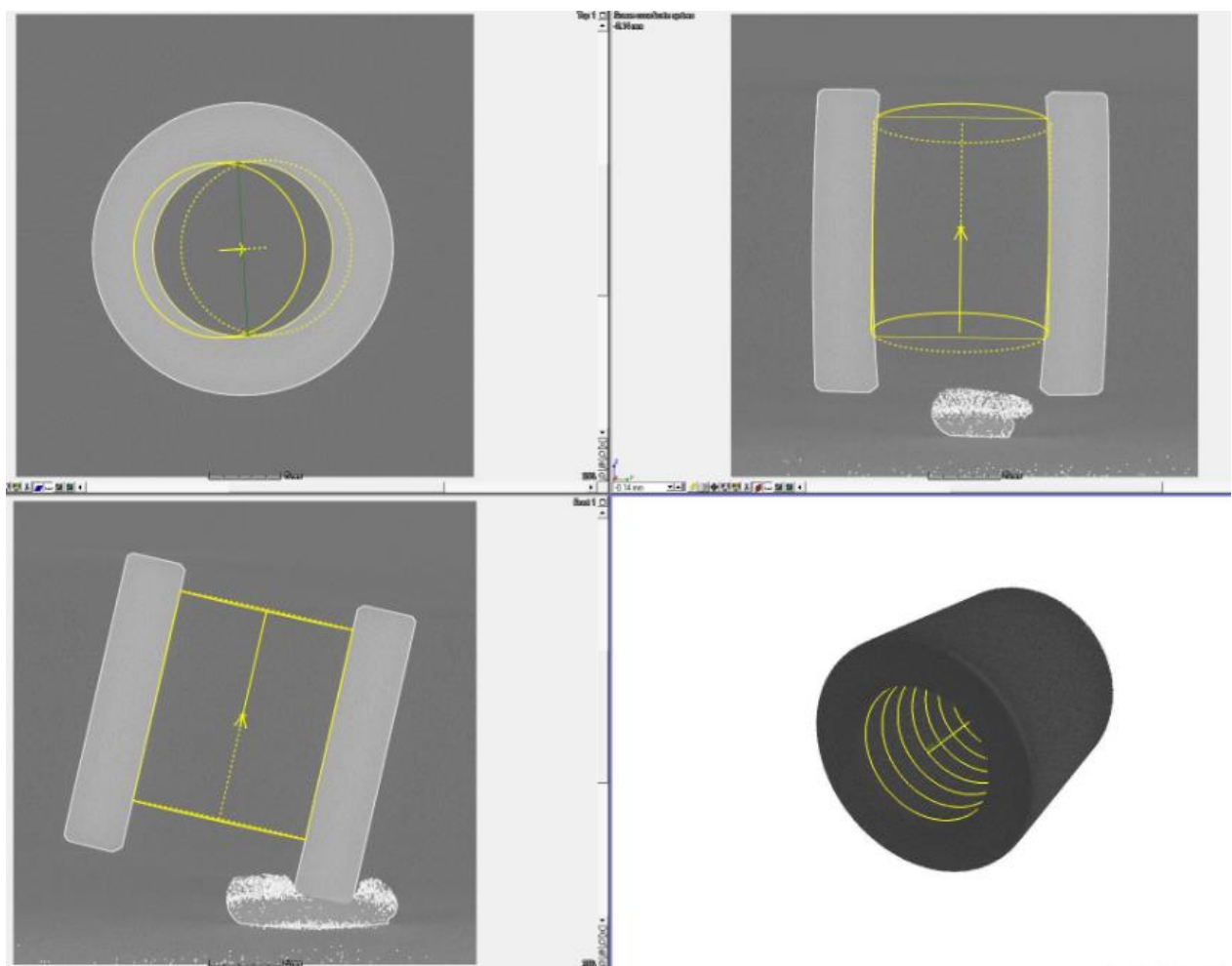
## 11. EKSPERIMENTALNI DIO

Svrha ovog dijela diplomskog rada je pokazati odnos između nekoliko modela u kojima se provode mjerenja dimenzija vanjskog promjera ( $\Phi_v$ ), unutarnjeg promjera ( $\Phi_u$ ) i duljine ( $L$ ) cilindra. Kreirano je 5 modela od kojih se svaki sastoji od mjerenja navedenih dimenzija i to ponavljajući mjerenje 3 puta. Mjerenja su provedena na CT uređaju naziva *Nikon XT H 225*. Na slici 26. prikazan je oblik cilindra koji se mjerio.



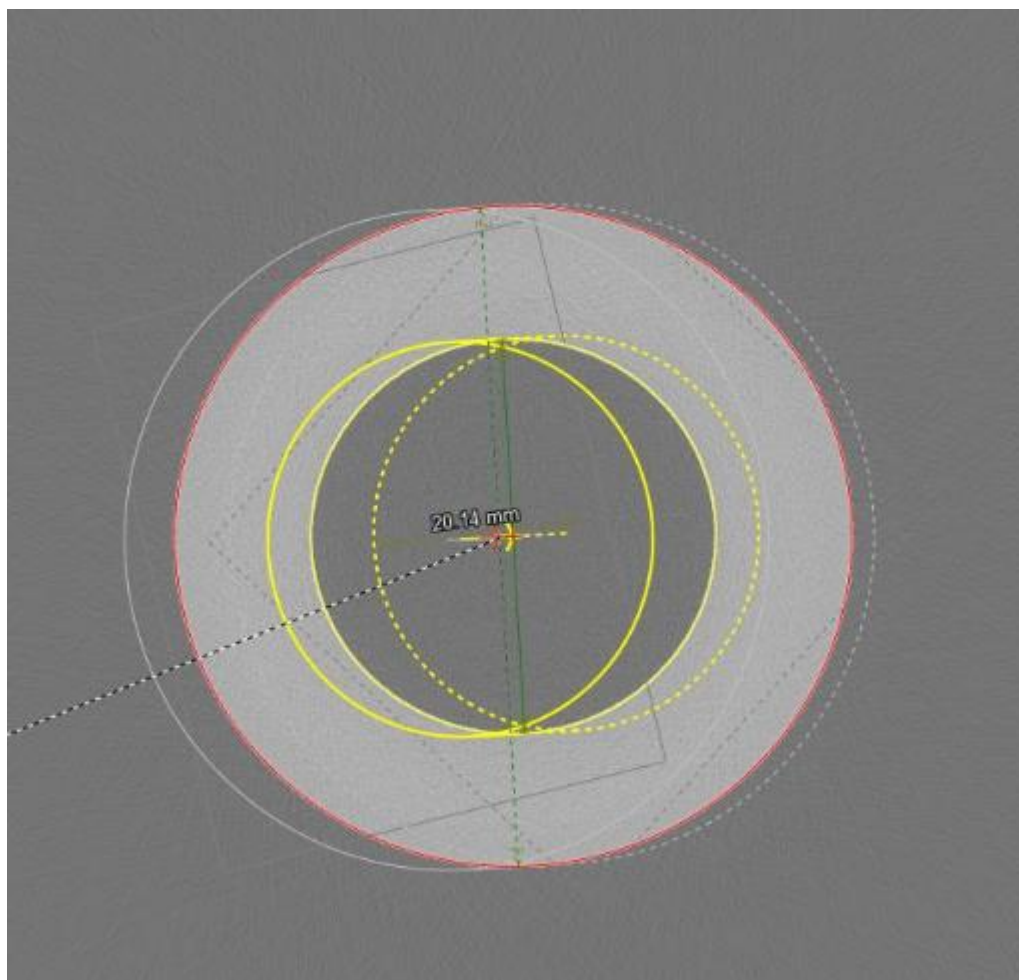
Slika 26. 3D model mjerenog cilindra

Slika 27. prikazuje analizirani cilindar u različitim presjecima.



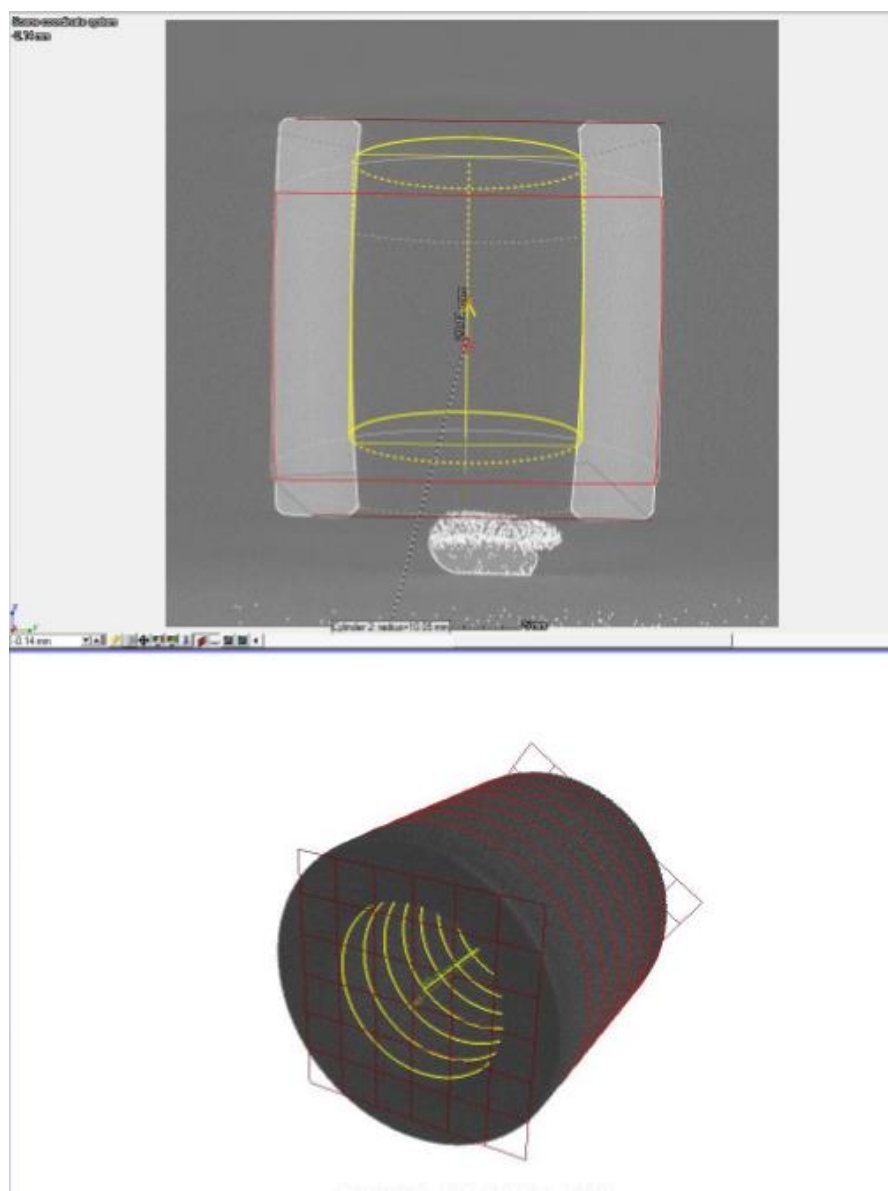
**Slika 27. Prikaz modela u raznim projekcijama**

Za početak analize odabrani su vanjski i unutarnji promjeri cilindra, kao što je i prikazano na slici 28.



**Slika 28. Prikaz promjera cilindra**

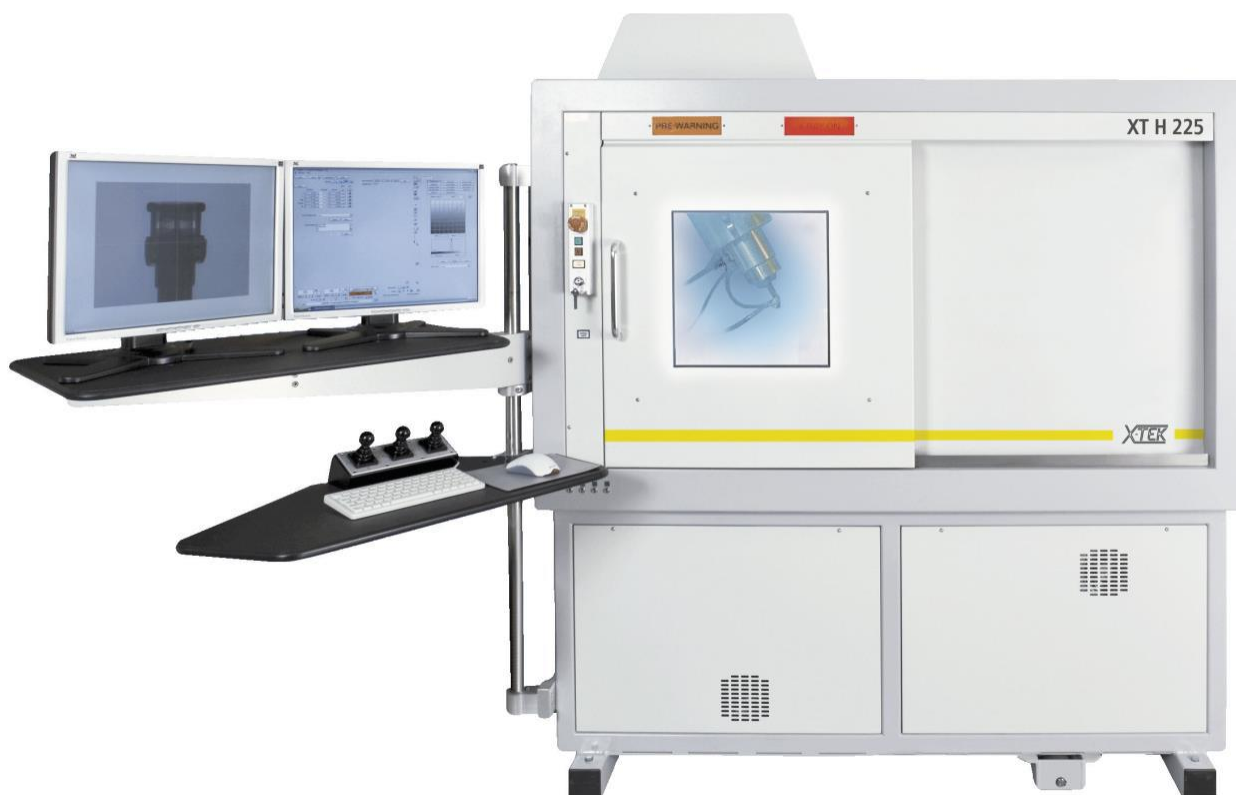
Na slici 29. prikazan je jedan od presjeka analiziranog cilindra s definiranom vrijednošću unutarnjeg promjera cilindra. Kreirane su dvije posebne ravnine na krajevima cilindra i mjeri se udaljenost između njih, čime je definirana duljina cilindra.



Slika 29. Prikaz mjerenja duljine cilindra

## 11.1 NIKON XT H 225

XT H 225 je razvijen pomoću tehnologije temeljene na 20-godišnjem iskustvu *X-Tek*-a u primjeni tehnologije rendgenskih zraka s mikrofokusima. Dizajniran je da daje kvalitetne rezultate na brz, jednostavan način. XT H 225 je idealan za primjenu širokog raspona, uključujući provjeru malih plastičnih dijelova i odljevaka, ali i istraživanje organskih materijala. Uređaj pruža interaktivnu vizualizaciju i potpuno automatski nadzor rendgenskih zraka, s dodatnim kompjutoriziranim prikazom tomografije (CT) za 3D analize unutrašnjosti ispitnih tijela [10].



Slika 30. Nikon XT H 225 [11]

Komponente Nikon XT H 225 uređaja [10]:

- Sustav sigurnosnih sklopki sa zaštitom od olova naponske razine 225 kV, čeličnim okvirom te ugrađenim vratima za postavljanje uzoraka.
- Rasklopivi mikrofokusni izvora naponske razine 225 kV rendgenskih zraka.
- Manipulator s 5 osi, s dodatnim CT dijelom.
- Klizna pristupna vrata s prozorom.
- Radna stanica sa softverskom kontrolom programa *Inspect-X*.

### 11.1.1 KLJUČNE ZNAČAJKE I PREDNOSTI NIKON XT H 225

Neke od glavnih značajki i prednosti korištenja baš ovoga uređaja uključuju [10]:

- Brzo snimanje podataka: izvor, detektor i softver su optimizirani za *real-time* vizualizaciju i obradu.
- Intuitivan, kratka prilagodba na rad s uređajem.
- Visoka kvaliteta slike u kratkom vremenu.
- Mali trošak posjedovanja.
- Sigurnost kao glavni kriterij dizajna.
- Kompaktan dizajn u koji se lako uklapaju dvostruka ulazna vrata.
- Jednostavno kretanje pomoću 3 kotača.
- Mala težina cjelokupne opreme, čime se izbjegava potreba za posebnom podlogom.
- Otvorena cijev rendgenskih zraka koja omogućuje lokalno održavanje unutarnjih dijelova cijevi.
- Moguća jednostavna integracija s industrijom pomoću standardnih post-obradnih aplikacija.

## 11.2 DIMENZIONALNO MJERENJE

Mjerenja su obavljena na CT uređaju naziva *XT H 225* od svjetski poznatog proizvođača *Nikon*. Softver koji se koristi za namještanje parametara skeniranja je *Inspect X*, a to je softver koji je na računalu na samom CT uređaju. Zadani su određeni parametri koji su konstantni tijekom mjerenja i dani su u tablici 3. Mjerenje se ponovilo 3 puta i to u 5 ponavljanja.

**Tablica 3. Konstantni parametri prilikom mjerenja**

NAPON ▼	JAKOST STRUJE ▼	X-OS ▼	Y-OS ▼	Z-OS ▼	BROJ PROJEKCIJA ▼
kV	μA	mm	mm	mm	/
130	30	0	170	300	1000



Nakon kreiranog modela potrebno je napraviti mjerenja na trodimenzionalnom modelu. U svrhu interpretiranja rezultata napravljano je 5 različitih modela mjerenja. Za izradu 3D modela korišten je softver "3D CT Pro". U svrhu provođenja analize mjerenja dimenzija vanjskog i unutarnjeg promjera te duljine korišten je softver *Volume Graphics Studio MAX 2.2*, a rezultati su dani u tablici 4.

**Tablica 4. Rezultati mjerenja**

#### PRVI MODEL

Vanjski promjer ( $\Phi_v$ ) ▾	Unutarnji promjer ( $\Phi_u$ ) ▾	Duljina (L) ▾
20,09 mm	12,06 mm	20,07 mm
20,09 mm	12,06 mm	20,05 mm
20,12 mm	12,08 mm	20,13 mm

#### DRUGI MODEL

Vanjski promjer ( $\Phi_v$ ) ▾	Unutarnji promjer ( $\Phi_u$ ) ▾	Duljina (L) ▾
20,15 mm	12,01 mm	20,13 mm
20,13 mm	12,01 mm	20,11 mm
20,19 mm	12,06 mm	20,19 mm

#### TREĆI MODEL

Vanjski promjer ( $\Phi_v$ ) ▾	Unutarnji promjer ( $\Phi_u$ ) ▾	Duljina (L) ▾
20,06 mm	12,08 mm	20,03 mm
20,07 mm	12,06 mm	20,02 mm
20,12 mm	12,13 mm	20,11 mm

#### ČETVRTI MODEL

Vanjski promjer ( $\Phi_v$ ) ▾	Unutarnji promjer ( $\Phi_u$ ) ▾	Duljina (L) ▾
20,14 mm	12,01 mm	20,12 mm
20,15 mm	12,01 mm	20,12 mm
20,20 mm	12,09 mm	20,19 mm

#### PETI MODEL

Vanjski promjer ( $\Phi_v$ ) ▾	Unutarnji promjer ( $\Phi_u$ ) ▾	Duljina (L) ▾
20,21 mm	11,94 mm	20,20 mm
20,23 mm	11,93 mm	20,20 mm
20,34 mm	12,07 mm	20,32 mm

Izmjerene dimenzije mogu se usporediti s obzirom na referentne vrijednosti cilindra koje su prikaze u tablici 5.

**Tablica 5. Referentne vrijednosti promatranih dimenzija cilindra**

Vanjski promjer ( $\Phi_v$ )	Unutarnji promjer ( $\Phi_u$ )	Duljina ( L )
20,102 mm	12,026 mm	20,078 mm

## 11.3 OBRADA PODATAKA

Nakon prikupljenih mjerenja pristupa se obradi rezultata.

### 11.3.1 ARITMETIČKA SREDINA

Prvo je potrebno izračunati aritmetičku sredinu  $i$ -tog mjernog niza za  $n_i$  rezultata mjerenja. Formula pomoću koje se dobiju aritmetičke sredine glasi [12]:

$$\bar{x}_i = \frac{\sum_{j=1}^n x_{ij}}{n_i}$$

Rezultati izračuna aritmetičkih sredina dani su u tablici 6. Iz toga je vidljivo da je za mjerenje vanjskog promjera najbolje koristiti prvi model jer je kod njega najmanja razlika u odnosu na referentnu vrijednost vanjskog promjera, a najveća razlika u odnosu na referentnu vrijednost za mjerenja vanjskog promjera pokazuje model 5. Kod mjerenja unutarnjeg promjera najbolji se pokazao drugi model jer je razlika u odnosu na referentnu vrijednost svega 0,001 mm dok se kao najnepovoljniji pokazuje model 3 koji za ovu dimenziju od referentne vrijednosti odstupa 0,064 mm. Za mjerenje duljine cilindra najmanja razlika u odnosu na referentnu vrijednost vidljiva je u prvom modelu jer je odstupanje sve 0,005 mm, a kao najlošija varijanta pokazuje se u petom modelu s razlikom od 0,162 mm. Uzimajući u obzir navedene rezultate dolazi se do zaključka da

je najbolji prvi model jer pokazuje najmanju razliku u odnosu na referentne vrijednosti i to za mjerenje vanjskog promjera i duljine cilindra, a kao najnepovoljniji se pokazao peti model.

**Tablica 6. Rezultati aritmetičkih sredina nizova**

**PRVI MODEL**

	Vanjski promjer (Φv) ▼	Unutarnji promjer( Φu) ▼	Duljina ( L) ▼
	20,09 mm	12,06 mm	20,07 mm
	20,09 mm	12,06 mm	20,05 mm
	20,12 mm	12,08 mm	20,13 mm
$\bar{x}$	20,100 mm	12,067 mm	20,083 mm

**DRUGI MODEL**

	Vanjski promjer (Φv) ▼	Unutarnji promjer( Φu) ▼	Duljina ( L) ▼
	20,15 mm	12,01 mm	20,13 mm
	20,13 mm	12,01 mm	20,11 mm
	20,19 mm	12,06 mm	20,19 mm
$\bar{x}$	20,100 mm	12,067 mm	20,083 mm

**TREĆI MODEL**

	Vanjski promjer (Φv) ▼	Unutarnji promjer( Φu) ▼	Duljina ( L) ▼
	20,06 mm	12,08 mm	20,03 mm
	20,07 mm	12,06 mm	20,02 mm
	20,12 mm	12,13 mm	20,11 mm
$\bar{x}$	20,157 mm	12,027 mm	20,143 mm

**ČETVRTI MODEL**

	Vanjski promjer (Φv) ▼	Unutarnji promjer( Φu) ▼	Duljina ( L) ▼
	20,14 mm	12,01 mm	20,12 mm
	20,15 mm	12,01 mm	20,12 mm
	20,20 mm	12,09 mm	20,19 mm
$\bar{x}$	20,083 mm	12,090 mm	20,053 mm

**PETI MODEL**

	Vanjski promjer (Φv) ▼	Unutarnji promjer( Φu) ▼	Duljina ( L) ▼
	20,21 mm	11,94 mm	20,20 mm
	20,23 mm	11,93 mm	20,20 mm
	20,34 mm	12,07 mm	20,32 mm
$\bar{x}$	20,260 mm	11,980 mm	20,240 mm

Također je potrebno izračunati aritmetičku sredinu od ukupnih  $N$  rezultata mjerenja. Za taj izračun se koristi formula [12]:

$$\bar{\bar{x}} = \frac{\sum_{i=1}^m \bar{x} * n_i}{N} = \frac{\sum_{i=1}^m \sum_{j=1}^n x_{ij}}{N}$$

Rezultati su prikazani u tablici 7. Uspoređujući dobivene rezultate s referentnim vrijednostima može se zaključiti da je najveće odstupanje kod mjerenja duljine cilindra, a najmanje kod mjerenja unutarnjeg promjera.

**Tablica 7. Aritmetičke sredine  $N$  rezultata mjerenja**

	Vanjski promjer ( $\Phi_v$ )	Unutarnji promjer ( $\Phi_u$ )	Duljina ( $L$ )
$\bar{\bar{x}}$	20,15 mm	12,04 mm	20,132 mm

### 11.3.2 EKSPERIMENTALNO STANDARDNO ODSUPANJE POJEDINAČNIH OPAŽANJA UNUTAR MJERNOG NIZA

Nakon aritmetičkih sredina potrebno je odrediti i procijenjeno standardno odstupanje pojedinačnih opažanja odnosno mjerenja unutar  $i$ -tog mjernog niza. Oznaka takvog standardnog odstupanja je  $S_i$ , a ona opisuje rasipanje pojedinačnog mjerenja unutar jednog niza oko njihove aritmetičke sredine. Izračunava se pomoću sljedeće formule [12]:

$$S_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^n (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{n_i - 1}}$$

Nakon provedenog izračuna dobiveni su rezultati koji su prikazani u tablici 8.

Tablica 8. Rezultati procijenjenih standardnih odstupanja unutar i-tog mjernog niza

**PRVI MODEL**

	Vanjski promjer ( $\Phi_v$ ) ▾	Unutarnji promjer ( $\Phi_u$ ) ▾	Duljina ( L ) ▾
	20,09 mm	12,06 mm	20,07 mm
	20,09 mm	12,06 mm	20,05 mm
	20,12 mm	12,08 mm	20,13 mm
Si	0,173 mm	0,0115 mm	0,0416 mm

**DRUGI MODEL**

	Vanjski promjer ( $\Phi_v$ ) ▾	Unutarnji promjer ( $\Phi_u$ ) ▾	Duljina ( L ) ▾
	20,15 mm	12,01 mm	20,13 mm
	20,13 mm	12,01 mm	20,11 mm
	20,19 mm	12,06 mm	20,19 mm
Si	0,0305 mm	0,028 mm	0,041 mm

**TREĆI MODEL**

	Vanjski promjer ( $\Phi_v$ ) ▾	Unutarnji promjer ( $\Phi_u$ ) ▾	Duljina ( L ) ▾
	20,06 mm	12,08 mm	20,03 mm
	20,07 mm	12,06 mm	20,02 mm
	20,12 mm	12,13 mm	20,11 mm
Si	0,032 mm	0,036 mm	0,049 mm

**ČETVRTI MODEL**

	Vanjski promjer ( $\Phi_v$ ) ▾	Unutarnji promjer ( $\Phi_u$ ) ▾	Duljina ( L ) ▾
	20,14 mm	12,01 mm	20,12 mm
	20,15 mm	12,01 mm	20,12 mm
	20,20 mm	12,09 mm	20,19 mm
Si	0,03 mm	0,0461 mm	0,0404 mm

**PETI MODEL**

	Vanjski promjer ( $\Phi_v$ ) ▾	Unutarnji promjer ( $\Phi_u$ ) ▾	Duljina ( L ) ▾
	20,21 mm	11,94 mm	20,20 mm
	20,23 mm	11,93 mm	20,20 mm
	20,34 mm	12,07 mm	20,32 mm
Si	0,07 mm	0,078 mm	0,069 mm

### 11.3.3 SKUPNO EKSPERIMENTALNO STANDARDNO ODSUPANJE POJEDINAČNOG OPAŽANJA UNUTAR MJERNIH SKUPOVA

Nakon pojedinačnih potrebno je izračunati i skupno procijenjeno standardno odstupanje pojedinog mjerenja unutar mjernih nizova. Skupno standardno odstupanje opisuje rasipanje pojedinačnih mjerenja unutar mjernih nizova oko njihove aritmetičke sredine. Oznaka kojom se prikazuje je  $s_r$ , a izračunava se prema formuli [12]:

$$s_r = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^m (n_i - 1) s_i^2}{\sum_{i=1}^m (n_i - 1)}}$$

Rezultati dobiveni nakon provedene analize su vidljivi u tablici 9.

**Tablica 9. Rezultati skupnih eksperimentalnih standardnih odstupanja pojedinačnih mjerenja unutar skupa**

	Vanjski promjer ( $\Phi_v$ )	Unutarnji promjer ( $\Phi_u$ )	Duljina ( L )
$s_r$	0,087 mm	0,0457 mm	0,0496 mm

### 11.3.4 EKSPERIMENTALNO STANDARDNO ODSUPANJE POJEDINAČNIH MJERENJA

Eksperimentalno standardno odstupanje pojedinačnih mjerenja se označava oznakom  $S$  i glasi isto kao i skupno procijenjeno standardno odstupanje pojedinog mjerenja unutar mjernih nizova ( $s_r$ ) jer je ispunjen uvjet koji se odnosi da se mjerenja provode u 5 mjernih nizova. To je vidljivo i iz formule, a  $m$  označuje o koliko modela se radi ( u ovom slučaju riječ je o 5 modela) [12]:

$$S = s_i = \sqrt{\frac{\sum_{j=1}^m (x_{ij} - \bar{x}_i)^2}{n_i - 1}}$$

### 11.3.5 PROCIJENJENO STANDARDNO ODSUPANJE ARITMETIČKIH SREDINA UZORAKA

Ova mjera se kod mjerne nesigurnosti koristi u vidu termina standardna nesigurnost A vrste jer ona pokazuje kolika je mjerna nesigurnost aritmetičke sredine. Izračun je jednostavan po formuli ( $n$  je u ovom slučaju 3) [12]:

$$S_{\bar{x}} = \frac{S}{\sqrt{n}}$$

Eksperimentalno standardno odstupanje aritmetičkih sredina uzoraka prikazano je u tablici 10.

Tablica 10. Rezultati procijenjenih standardnih odstupanja aritmetičkih sredina uzoraka

	Vanjski promjer ( $\Phi_v$ )	Unutarnji promjer ( $\Phi_u$ )	Duljina ( $L$ )
$S_{\bar{x}}$	0,0526 mm	0,026 mm	0,028 mm

### 11.3.6 MEĐULABORATORIJSKO EKSPERIMENTALNO STANDARDNO ODSUPANJE

Ova statistička mjera standardnog odstupanja se izračunava jednostavno korištenjem formule [12]:

$$S_L = \sqrt{\frac{S_d^2 - S_r^2}{\bar{n}}}$$

Međutim prvo je potrebno izračunati  $\bar{n}$  koji se dobije prema formuli [12]:

$$\bar{n} = \frac{1}{m-1} \left( \sum_{i=1}^m n_i - \frac{\sum_{i=1}^m n_i^2}{\sum_{i=1}^m n_i} \right) = \frac{1}{5-1} \left( 15 - \frac{45}{15} \right) = 3$$

Rezultati analize vidljivi su u tablici 11.

Tablica 11. Rezultati među laboratorijskog eksperimentalnog standardnog odstupanja

	Vanjski promjer ( $\Phi_v$ )	Unutarnji promjer ( $\Phi_u$ )	Duljina (L)
$S_L$	0,048 mm	0,032 mm	0,064 mm

### 11.3.7 EKSPERIMENTALNO STANDARDNO ODSUPANJE ARITMETIČKIH SREDINA MJERNIH NIZOVA OKO ARITMETIČKE SREDINE SVIH OPAŽANJA

Procijenjeno standardno odstupanje aritmetičkih sredina ( $s_d$ ) pokazuje koliko je rasipanje aritmetičkih sredina mjernih nizova oko aritmetičke sredine svih mjerenja, a izračunava se pomoću slijedeće formule [12]:

$$S_d = \sqrt{\frac{1}{m-1} \sum_{i=1}^m n_i * (\bar{x}_i - \bar{\bar{x}})^2}$$

Nakon uvrštavanja u spomenutu formulu dobiveni su rezultati kao u tablici 12.

Tablica 12. Rezultati standardnih odstupanja aritmetičkih sredina mjernih nizova oko aritmetičke sredine svih mjerenja

	Vanjski promjer ( $\Phi_v$ )	Unutarnji promjer ( $\Phi_u$ )	Duljina (L)
$S_d$	0,12 mm	0,073 mm	0,124 mm

### 11.3.8 EKSPERIMENTALNO STANDARDNO ODSUPANJE OBNOVLJIVOSTI

Procijenjeno standardno odstupanje obnovljivosti se izračuna prema formuli [12]:

$$S_R = \sqrt{S_r^2 + S_L^2}$$



Rezultati proračuna standardnog odstupanja obnovljivosti prikazan je u tablici 13.

**Tablica 13. Rezultati procijenjene standardnog odstupanja obnovljivosti**

	Vanjski promjer ( $\Phi_v$ )	Unutarnji promjer ( $\Phi_u$ )	Duljina (L)
$S_R$	0,1 mm	0,056 mm	0,081 mm

### 11.3.9 MJERNA VRIJEDNOST PONOVLJIVOSTI

Ova vrijednost pokazuje vrijednost unutar koje se može očekivati da leži razlika dvaju pojedinačnih rezultata mjerenja, uz vjerojatnost  $P$ , a računa se prema formuli [12]:

$$r = t\sqrt{2}S_r$$

Oznaka  $t$  pokazuje tkz. studentov faktor, a izračuna se prema formuli:

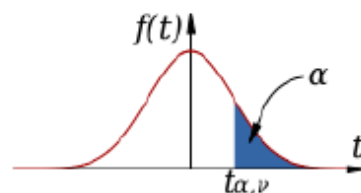
$$v = n - 1$$

,a  $v$  očitava se iz tablice Studentove razdiobe dok je  $n$  broj stupnjeva slobode (o ovom primjeru 3).

Potrebno je također odabrati prag signifikantnosti  $\alpha$ , a u ovom slučaju to je 5%.

Tablica 14. Studentova t- razdioba

Table of Critical Values,  $t_{\alpha, \nu}$ , in a Student  $t$ -Distribution with  $\nu$  degrees of freedom and a confidence limit  $p$  where  $\alpha=1-p$ .

Confidence Limits (top) and  $\alpha$  (bottom) for a One-Tailed Test.

$\nu$	60%	75%	80%	85%	90%	95%	97,5%	98%	99%	99,5%	99,75%	99,9%	99,95%
	0,4	0,25	0,2	0,15	0,1	0,05	0,025	0,02	0,01	0,005	0,0025	0,001	0,0005
1	0,32492	1,00000	1,37638	1,96281	3,07768	6,31375	12,70620	15,89454	31,82052	63,65674	127,32134	318,30884	636,61925
2	0,28868	0,81650	1,06066	1,38621	1,88562	2,91999	4,30285	4,84873	6,96456	9,92484	14,08905	22,32712	31,59905
3	0,27667	0,76489	0,97847	1,24978	1,63774	2,35336	3,18245	3,48191	4,54070	5,84091	7,45332	10,21453	12,92398
4	0,27072	0,74070	0,94096	1,18957	1,53321	2,13185	2,77645	2,99853	3,74695	4,60409	5,59757	7,17318	8,61030
5	0,26718	0,72669	0,91954	1,15577	1,47588	2,01505	2,57058	2,75651	3,36493	4,03214	4,77334	5,89343	6,86883
6	0,26483	0,71756	0,90570	1,13416	1,43976	1,94318	2,44691	2,61224	3,14267	3,70743	4,31683	5,20763	5,95882
7	0,26317	0,71114	0,89803	1,11916	1,41492	1,89458	2,36462	2,51675	2,99795	3,49948	4,02934	4,78529	5,40788
8	0,26192	0,70639	0,88889	1,10815	1,39682	1,85955	2,30600	2,44898	2,89646	3,35539	3,83252	4,50079	5,04131
9	0,26096	0,70272	0,88340	1,09972	1,38303	1,83311	2,26216	2,39844	2,82144	3,24984	3,68966	4,29681	4,78091
10	0,26018	0,69981	0,87906	1,09306	1,37218	1,81246	2,22814	2,35931	2,76377	3,16927	3,58141	4,14370	4,58689
11	0,25956	0,69745	0,87553	1,08767	1,36343	1,79588	2,20099	2,32814	2,71808	3,10581	3,49661	4,02470	4,43698
12	0,25903	0,69548	0,87261	1,08321	1,35622	1,78229	2,17881	2,30272	2,68100	3,05454	3,42844	3,92963	4,31779
13	0,25859	0,69383	0,87015	1,07947	1,35017	1,77093	2,16037	2,28160	2,65031	3,01228	3,37247	3,85198	4,22083
14	0,25821	0,69242	0,86805	1,07628	1,34503	1,76131	2,14479	2,26378	2,62449	2,97684	3,32570	3,78739	4,14045
15	0,25789	0,69120	0,86624	1,07353	1,34061	1,75305	2,13145	2,24854	2,60248	2,94671	3,28604	3,73283	4,07277

Rezultati analize ponovljivosti dani su u tablici 15.

Tablica 15. Rezultati mjerne vrijednosti ponovljivosti

	Vanjski promjer ( $\Phi_v$ )	Unutarnji promjer ( $\Phi_u$ )	Duljina (L)
r	0,36 mm	0,189 mm	0,205 mm

### 11.3.10 MJERNA VRIJEDNOST OBNOVLJIVOSTI

Ova vrijednost pokazuje iznos unutar kojeg se može očekivati da leži apsolutna razlika između dva rezultata mjerenja, uz vjerojatnost  $P$ , a računa se prema formuli [12]:

$$R = t\sqrt{2}S_R$$

Oznaka  $t$  pokazuje tkz. studentov faktor, a također se izračunava prema formuli:

$$v = n - 1$$

,a  $v$  se ponovno očitava iz tablice Studentove razdiobe dok je  $n$  broj stupnjeva slobode (o ovom primjeru 3). Potrebno je također odabrati prag signifikantnosti  $\alpha$ , a u ovom slučaju to je 5%. Rezultati analize obnovljivosti mogu se iščitati iz tablice 16.

Tablica 16. Rezultati mjerne vrijednosti obnovljivosti

	Vanjski promjer ( $\Phi_v$ )	Unutarnji promjer ( $\Phi_u$ )	Duljina ( $L$ )
R	0,41 mm	0,232 mm	0,334 mm

### 11.3.11 KRITIČNA RAZLIKA PONOVLJIVOSTI

Kritična razlika ponovljivosti je vrijednost unutar koje se može očekivati da leži razlika dvaju pojedinačnih rezultata mjerenja, uz definiranu vjerojatnost, a računa se prema formuli [12]:

$$C_r D_r = \frac{r}{\sqrt{n}}$$

Rezultati izračuna kritične razlike ponovljivosti vidljivi su u tablici 17.

Tablica 17. Rezultati kritične razlike ponovljivosti

	Vanjski promjer ( $\Phi_v$ )	Unutarnji promjer ( $\Phi_u$ )	Duljina (L)
CrDr	0,2075 mm	0,109 mm	0,118 mm

Nakon izračuna kritičnih razlika ponovljivosti potrebno je rezultate usporediti s vrijednostima kritičnih razlika između iznosa maksimalne i minimalne vrijednosti aritmetičkih sredina, a ta usporedba vidljiva je u tablici 18.

Tablica 18. Prikaz odnosa ponovljivosti

	Vanjski promjer ( $\Phi_v$ )	Unutarnji promjer ( $\Phi_u$ )	Duljina (L)
$C_r D_r$	0,2075 mm	0,109 mm	0,118 mm
$C_r D_r  \bar{x}_{i \max} - \bar{x}_{i \min} $	0,177 mm	0,11 mm	0,187 mm

Usporedbom rezultata vidljivo je da:

$$0,2075 \text{ mm} > 0,177 \text{ mm}$$

$$0,109 \text{ mm} < 0,11 \text{ mm}$$

$$0,118 \text{ mm} < 0,187 \text{ mm}$$

Iz usporedbe prethodno navedenih rezultata može se zaključiti da su rezultati mjerenja nisu ponovljivi jer je kritična razina ponovljivosti kod unutarnjeg promjera i duljine cilindra manja od kritičnih razlika između maksimalne i minimalne vrijednosti aritmetičke sredine.

### 11.3.12 KRITIČNA RAZLIKA OBNOVLJIVOSTI

Kritična razlika obnovljivosti je vrijednost unutar koje se može očekivati da leži apsolutna razlika između dva rezultata mjerenja, uz definiranu vjerojatnost, a izračunava se prema slijedećoj formuli [12]:

$$C_r D_R = \sqrt{R^2 - r^2 \left(1 - \frac{1}{n}\right)}$$

Rezultati izračuna kritične razlike obnovljivosti vidljivi su u tablici 19.

**Tablica 19. Rezultati kritične razlike obnovljivosti**

	Vanjski promjer ( $\Phi_v$ )	Unutarnji promjer ( $\Phi_u$ )	Duljina (L)
$CrD_R$	0,286 mm	0,173 mm	0,289 mm

Nakon izračuna kritičnih razlika obnovljivosti potrebno je rezultate usporediti s vrijednostima kritičnih razlika između iznosa maksimalne i minimalne vrijednosti aritmetičkih sredina, a ta usporedba vidljiva je u tablici 20.

**Tablica 20. Prikaz odnosa obnovljivosti**

	Vanjski promjer ( $\Phi_v$ )	Unutarnji promjer ( $\Phi_u$ )	Duljina (L)
$C_r D_R$	0,286 mm	0,173 mm	0,289 mm
$C_r D_R  \bar{x}_{i\max} - \bar{x}_{i\min} $	0,177 mm	0,11 mm	0,187 mm

Usporedbom rezultata vidljivo je da:

$$0,286 \text{ mm} > 0,177 \text{ mm}$$

$$0,173 \text{ mm} > 0,11 \text{ mm}$$

$$0,289 \text{ mm} > 0,187 \text{ mm}$$

Iz usporedbe prethodno navedenih rezultata može se zaključiti da su rezultati mjerenja obnovljivi.

## 12. ZAKLJUČAK

Računalna tomografija je nova metoda u dimenzionalnom mjeriteljstvu koja omogućuje mjerenje kako vanjskih, tako i unutarnjih geometrija i kontura predmeta. Da bi se osigurali dobri rezultati mjerenja na CT uređajima potrebno je osigurati mjernu sljedivost. Uređaj radi na principu skeniranja predmeta rendgenskim zrakama i daje snimke velikog broja dvodimenzionalnih prikaza predmeta pri različitim kutevima gledanja. Tako dobiveni zapisi snimaka iz više 2D skenova nastaje jedan 3D model.

Primjena CT-a u industriji ima mnoge prednosti, a kao glavna se nameće mogućnost provođenja nerazornih ispitivanja za provjeru proizvoda. Samim time smanjeni su troškovi dodatnih analiza i provjera. Nadalje, omogućena je brza provjera vanjskih i unutarnjih komponenata proizvoda. Sljedeća prednost je velika preciznost bez potrebe stezanja elementa prilikom snimanja pa se time izbjegavaju pojave deformacija i oštećenja. Glavni nedostatak računalne tomografije u području dimenzionalnog mjeriteljstva jest izostanak mjeriteljske sljedivosti, a povezano s tim i nepoznata mjerne nesigurnost rezultata mjerenja.

U radu je detaljno razrađen postupak analize rezultata mjerenja, sukladno normi ISO 5725:1994(E), koji uključuje utvrđivanje grubih pogrešaka i homogenosti standardnih odstupanja unutar i između mjernih nizova. Sama preciznost rezultata utvrđena je procjenom ponovljivosti i obnovljivosti rezultata mjerenja, te usporedbom rezultata s kritičnim razlikama ponovljivosti odnosno obnovljivosti. Točnost rezultata mjerenja utvrđena je usporedbom rezultata mjerenja s referentnim vrijednostima.

Najveća prednost analize, koja je opisana u eksperimentalnom dijelu rada, je njezina univerzalna primjena na svim područjima koji posjeduju izmjerene rezultate. Temeljem analize provedene u radu moguće je zaključiti da se primjenom odgovarajuće metode može na vrlo kvalitetan način analizirati izmjereni podaci.

Zaključno se može reći da će se rezultate dobivene analizom provedenih mjerenja pomoću računalne tomografije morati uzimati s rezervom sve dok se ne utvrdi mjeriteljska sljedivost. Nakon provedene analize mjerenja dimenzija vanjskog i unutarnjeg promjera te duljine cilindra nameće se zaključak sa su rezultati obnovljivi, ali da nisu ponovljivi.

## 13. LITERATURA

- (1) Sun, Brown, Leach, "An overview of industrial X-ray computed tomography", Queen's Printer and Controller of HSMO, Middlesex, 2012.
- (2) Kruth, Bartscher, Carmignato, Schmitt, De Chiffre, Weckenmann, "Computed tomography for dimensional metrology", *CIRP Annals - Manufacturing Technology*
- (3) Runje, B. : Predavanja iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja, Zagreb, 2013
- (4) Surhaj, M - Validacija numeričkih modela mehaničkog ponašanja kostiju - doktorski rad
- (5) Gapinski, Wieczorowski, Marciniak-Podsadna, Dybala, Ziolkowski, "Comparison of Different Methods of Measurement Geometry using CMM, Optical Scanner and Computed Tomography 3D", Poznan. 2014.
- (6) Carmignato, Pierobon, Rampazzo, Parisatto, Savio, "CT for Industrial Metrology - Accuracy and Structural Resolution of CT Dimensional Measurements", Padova, Italy
- (7) Muller, "Influence parameters in CT scanning", 2011.
- (8) Cantatore, Pavel, "Introduction to computed tomography", DTU, Denmark, 2011.
- (9) "Međunarodni mjeriteljski rječnik-Osnovni i opći pojmovi i pridruženi nazivi (VIM)", Državni zavod za mjeriteljstvo, 2008.
- (10) "XT H 225 X-ray System", Operator Manual, Nikon Metrology, 2012.
- (11) [http://www.nikon.com/products/industrial-metrology/lineup/xray\\_ct/ct/xth225/index.htm](http://www.nikon.com/products/industrial-metrology/lineup/xray_ct/ct/xth225/index.htm)
- (12) Runje, B. : Laboratorijske vježbe iz kolegija Teorija i tehnika mjerenja, Mjerenje debljine stijenke cijevi, Zagreb, 2016.
- (13) ISO 5725:1994 (E), Točnost (istinitost i preciznost) mjernih metoda i rezultata